MEMES: LOS GENES DE LA CULTURA • TOMA CIENTIFICA DE DECISIONES

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CIRUGIA POR ROBOT

a corazón abierto

INFORME ESPECIAL:

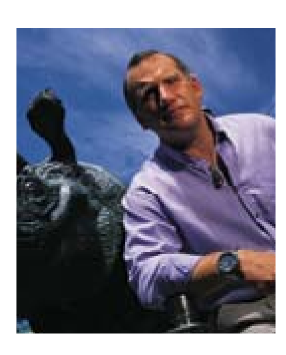
Presente y futuro de Internet

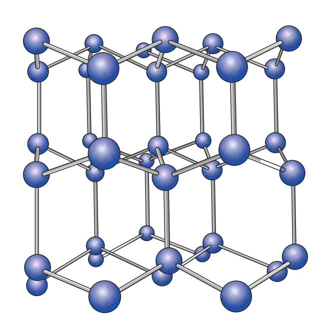




Diciembre de 2000 Número 291

SECCIONES











Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

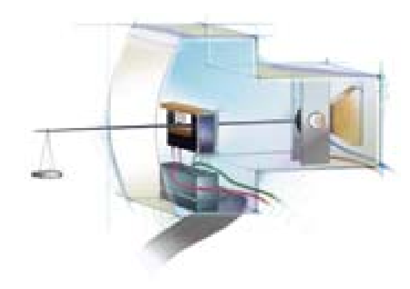


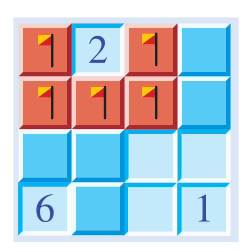




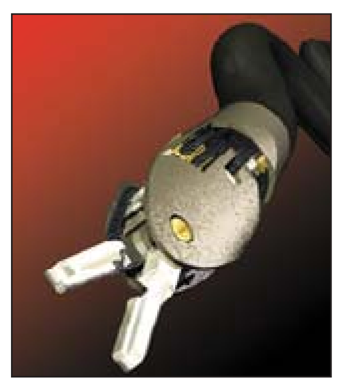


SECCIONES









Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5-11	Antoni Prevosti y Lluís Serra
14	Slim Films
16-18	Jennifer Johansen
19	Cortesía de Tak Architects, Yanagisawa, Tokio
20	F. Schrenk (*izquierda*); Bundesanstalt für Geowissenschaften (*derecha*)
21	Wildlife Art, Schnaubelt & N. Kieser/Sina Althöfer, Hessisches Landesmuseum Darmstadt (*izquierda*); T. Ernsting/Bilderberg (*derecha*)
22	O. Sandrock (*izquierda* y *derecha*); T. Ernsting/Bilderberg (*centro*)
23	F. Schrenk, Spektrum der Wissenschaft (*arriba*); Kurt Alt y T. Ernsting (*abajo*)
24	O. Sandrock, SdW
25	F. Schrenk, SdW
26	F. Schrenk/Wildlife Art, W. Schnaubelt & N. Kieser, Hessisches Landesmuseum Darmstadt/NASA
27	Marisa Blume, SdW
38-39	Owen Franken *Corbis*
40-41	Carol Donner (*dibujos*); Chris Timmers (*fotografía*)
42	Peter Menzel (*arriba*); Intuitive Surgical (*abajo*)
43	Peter Menzel
44-49	Dusan Petricic
50	Nobuyuki Nishitani y Riitta Hari
51-52	Dusan Petricic
53	Mary Ann Chastain
54	©Fotogr. Musée de l'Armée, París
55	BASF
56	Museo del Color, Bradford (*arriba*); Biblioteca de la Opera (*abajo*)
57	Pour la Science (*arriba*); D. R. (*abajo*)
58-59	Pour la Science
61	Kaku Kurita (*arriba*); XPlane (*abajo*)
62-63	XPlane
64-65	Cortesía de Lernout & Hauspie y Nokia
66-67	XPlane (*ilustración*); Jennifer Johansen (*gráficas*)
68-70	XPlane
71	Jennifer Johansen
72	XPlane
73	XPlane, fuentes: International Telecommunications Union, European Commission, eMarketer y agencias nacionales
74-77	XPlane
78-79	Daniels & Daniels
80-81	Bryan Christie
82	Patricia J. Wynne
90-91	Bryan Christie

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

José M.ª Valderas Martínez: *Decisiones racionales* y *Nexos*; Francesc Asensi: *Corredor de homínidos en Africa sudoriental*; Esteban Santiago: *Cirugía cardíaca avanzada*; Marián Carretero: *El poder de los memes*; Agustí Nieto Galán: *Descubrimiento de los colorantes sintéticos*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Campos: *Agua. El enlace de hidrógeno*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.500 pta. 69,12 euro	21.500 pta. 129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TELEVISIÓN EN COLOR. «La Comisión Federal de Comunicaciones ha adoptado por fin el sistema de televisión en color propuesto por la Columbia Broadcasting System. El sistema de "campo secuencial" dispone de unos filtros de color montados sobre un rodete giratorio situado delante de las cámaras, los cuales descomponen la imagen en sus tres colores primarios. En el receptor esas imágenes se reproducen sobre la pantalla de un tubo y el color se recupera merced a otro rodete de filtros sincronizado con el de la cámara. La imagen de la CBS no pueden recibirla en blanco y negro los ocho millones de televisores cuya existencia se estima, a menos que sean equipados con un "adaptador".» [*Nota de la Redacción: La falta de interés público en este sistema detuvo las emisiones en color al cabo de pocos meses.*]

PELIGROSA ESTRATOSFERA. «Cuando se hagan realidad los vuelos intercontinentales a través de la estratosfera, habrá que tener en cuenta el riesgo de la radiación cósmica, cuya intensidad aumenta con la altitud. Hermann J. Shaefer, de la Escuela Naval de Medicina Aeronáutica, en Pensacola (Florida), estima que a 21.000 metros la radiación cósmica es de 15 miliröntgens diarios, muy por encima de lo establecido por la Comisión de Energía Atómica en su norma de seguridad en la exposición a las radiaciones. Tales dosis no causan daños fisiológicos apreciables. "Pero", afirma Shaefer, "la perspectiva de que el futuro tráfico aéreo comercial se efectúe a esas altitudes y de que un porcentaje creciente de la población se exponga a tales dosis es negativo desde un punto de vista genético."»

TERAPIA DE GRUPO. «Del tronco principal del psicoanálisis han brotado un conjunto de métodos de tratamiento. Uno de ellos es la psicoterapia de grupo, en el que éste constituye un elemento importante del proceso terapéutico. En una de las formas de tratamiento, la terapia de grupo (*véase la figura*), se pone el acento en las entrevistas y la discusión. Cada grupo se compone de pacientes afectados de los mismos síndromes psicológicos generales. Cuando los egos y superegos de los pacientes bajan sus defensas, los individuos revelan sin dificultad sus problemas más íntimos y parecen liberarse casi por completo de lo que suele conocerse como "consciencia del yo". El método se sigue actualmente en muchos lugares de este país y del extranjero.»

...cien años

LA POBLACIÓN EN EL AÑO 3000. «La fórmula que cuadra el crecimiento de la población de EE.UU. entre 1790 y 1890 es la base más verosímil para predecir la población futura, contando, por supuesto, con que se mantengan las mismas condiciones generales que en el pasado. Una variación marcada en la tasa de natalidad o una hambruna generalizada evidenciarían notables discrepancias. Hacia el año 2000 la población de EE.UU. (excluidos Alaska y los indios de las reservas) habrá crecido hasta 385.000.000, mientras que, de continuar la misma tasa de crecimiento durante mil años, la cifra alcanzaría un enorme total de 41.000.000.000.» —H. S. Pritchett, presidente del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



Terapia de grupo analítica, 1950

...ciento cincuenta años

SALCHICHAS TÓXICAS. «Las salchichas alemanas se hacen de sangre, sesos, hígado, carne de cerdo, etc., los cuales, con especias, se embuchan en el interior de tripas, se cuecen y se ahúman. Si el ahumado es deficiente, las salchichas fermentan, se ablandan y palidecen levemente por el centro, estado en el que causan, a quienes las ingieren, un conjunto de alteraciones extraordinarias seguidas de muerte. El poder tóxico de las salchichas en fermentación depende, primero, del estado de movimiento o transposición de los átomos de las sustancias orgánicas que contienen y, segundo, de que esas moléculas en movimiento puedan comunicar su movimiento a los elementos de la sangre y los tejidos de quienes las comieron, un estado de disolución análogo al de ellas. Las sustancias orgánicas se hacen inocuas cuando cesa la fermentación; por consiguiente, cocer las salchichas las reconstituye, y también el remojo en alcohol.»

MONTÍCULOS INDIOS DE CONCHAS. «En las proximidades de Mobile (Alabama) son muy corrientes, y realmente admirables, los bancos de conchas. Un poco más allá de la ciudad hay un enorme banco de conchas de bivalvo, de algo más de siete metros y medio de hondo, donde se han hallado restos de útiles de cocina evidentemente de origen indio. Las gentes del sur construían unos caminos excelentes con esas conchas. En la bahía de Bonne Secour hay un gran cerro de conchas de ostras, de unos veinte metros de altura, del que ya se han obtenido considerables cantidades de cal.»

La evolución biológica, su ritmo y predicción

La evolución puede ser muy rápida y la trayectoria seguida, repetirse. Nos lo demuestran las clinas, que nos permiten predecir las respuestas adaptativas ante perturbaciones naturales o antropogénicas

Antoni Prevosti y Lluís Serra

La selección natural, mecanismo motor de la evolución biológica, se basa en la reproducción diferencial de los individuos integrantes de una población. Débese tal disparidad en el éxito reproductor a la distinta capacidad de los componentes de la población para sobrevivir y perpetuarse. El origen de esas diferencias se halla en las mutaciones, que son cambios originados de forma aleatoria en el genoma. Mutaciones producidas, además, por causas independientes del efecto ejercido en las características de los organismos. Porque existe plena independencia entre las causas y los efectos de las mutaciones decimos que éstas son aleatorias.

Las variaciones a que las mutaciones dan lugar se inscriben en una triple categoría, a saber, deletéreas, beneficiosas o neutras. Llamamos deletéreas a las variaciones —y por ende a las mutaciones causantes de las mismas— que merman la capacidad de supervivencia o de reproducción de los organismos donde se manifiestan. Cuando tal ocurre, lo más probable es que la selección acabe por eliminarlas, pues sus portadores tendrán menos posibilidades de dejar descendientes que los demás organismos de su población. Son neutras las variaciones que ni aumentan ni disminuyen la probabilidad de supervivencia y reproducción de sus portadores. En este caso, su destino final depende del azar, que las eliminará de la población donde han aparecido o las fijará en ella. Las variaciones que reportan un efecto beneficioso para los organismos constituyen la materia prima de la evolución por selección natural. Tales mutaciones incrementan la probabilidad procreadora de sus portadores, lo que significa que las características resultantes aumentan su frecuencia y pueden llegar a fijarse en la población.

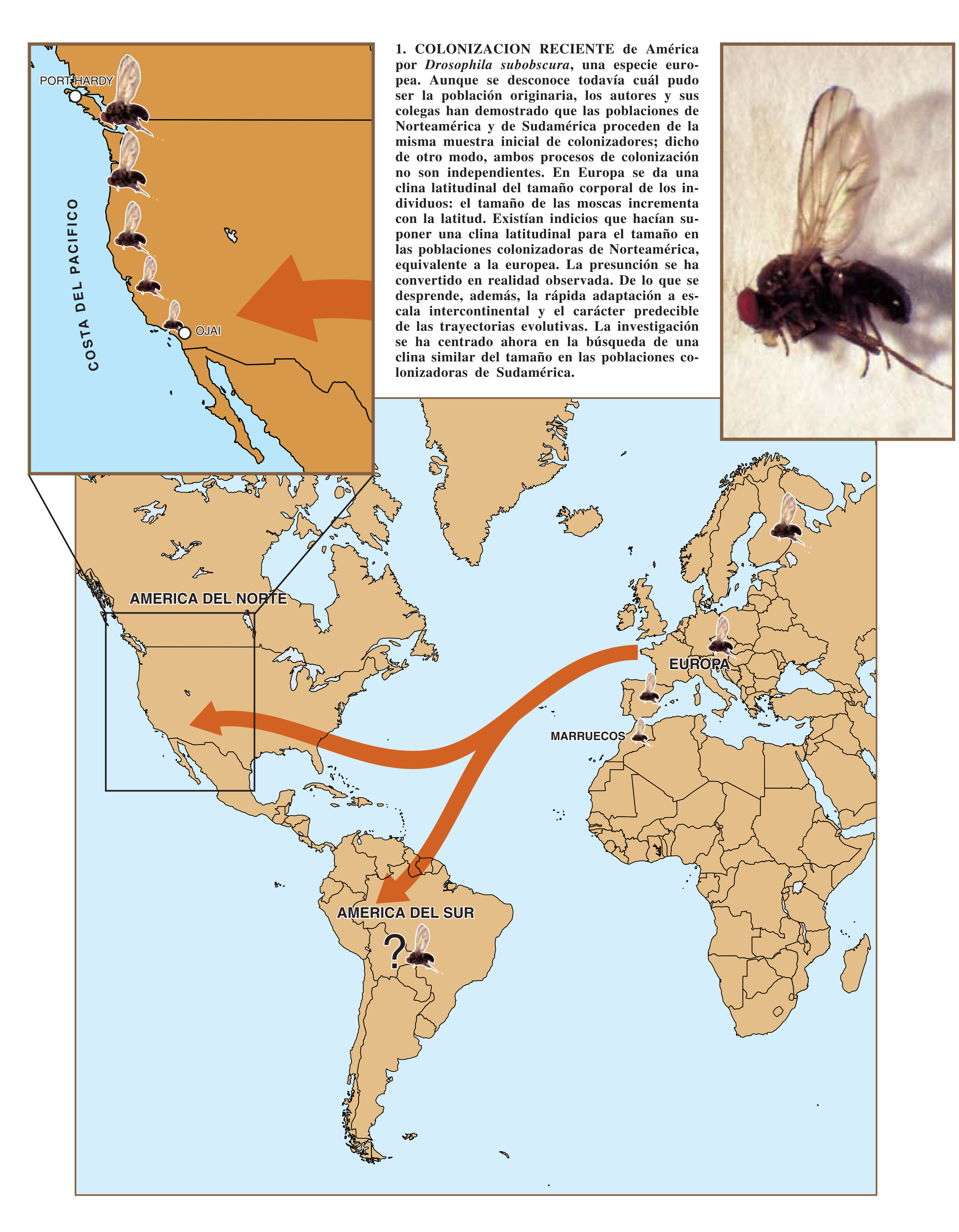
Sin la selección natural no podríamos entender la evolución biológica. Da cuenta de la función que cumplen numerosas propiedades de la evolución. Impulsados por la selección, los organismos establecen relaciones con el ambiente donde viven, propicias para su supervivencia, y adquieren, además, una organización interna de suerte tal, que las funciones específicas de los miembros componentes se integran y forman un sistema eficaz. Las características de la evolución por selección natural, en la que se originan propiedades útiles para los organismos mediante cambios aleatorios, pueden compararse a un proceso de adquisición de conocimientos por tanteo. Si ahondamos más, y recordamos el paralelismo entre las características de los sistemas vivos y las de un sistema informático, la comparación de la evolución por selección natural con un proceso de adquisición de conocimientos por tanteo podría llevarse más allá de la pura analogía. Cabría afirmar que la evolución por selección natural *es* un proceso de adquisición de conocimientos por tanteo.

Aunque la exposición teórica de la evolución por selección natural resulta clara y bastante sencilla, el estudio de la misma en la naturaleza presenta considerables dificultades. En general, cuesta obtener, por investigación directa de las poblaciones naturales, toda la información necesaria para interpretar el origen de la notable variabilidad que éstas suelen mostrar. Pero se están dando pasos en el camino de la superación de tales obstáculos. En ese contexto, el ejemplo que motiva nuestro artículo —la colonización de América por *Drosophila subobscura*— reviste especial interés. Se trata, en efecto, de la observación directa de un proceso evolutivo actuante.

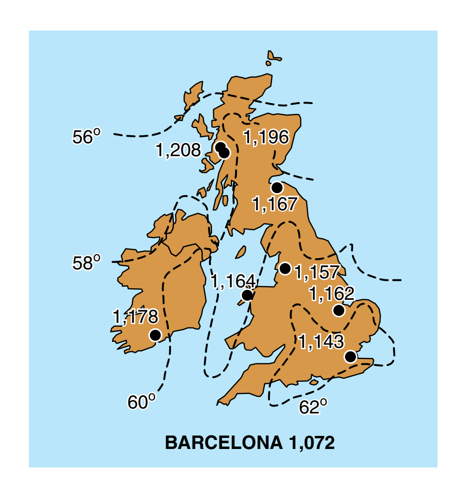
Intensidad de la selección

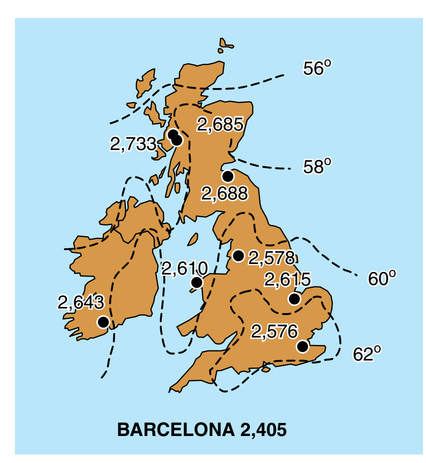
La intensidad de la selección, es decir, la dispar eficacia biológica de los distintos genotipos o fenotipos de una misma especie (polimorfismo), puede estimarse de modos diversos. En algunas especies polimórficas, la frecuencia de cada tipo depende de la situación geográfica de las poblaciones estudiadas. Se observa a veces que la frecuencia de un tipo incrementa de manera gradual en una dirección determinada. Lo vemos corroborado en el págalo

ANTONI PREVOSTI y LLUIS SERRA vienen investigando desde hace años las clinas y otros procesos asociados a la selección natural. Prevosti actualmente es catedrático emérito de genética de la Universidad de Barcelona, habiendo sido el primer catedrático de genética de la universidad española. Serra, que fue vicerrector de la Universidad de Barcelona, es catedrático de genética en la misma.



1. COLONIZACION RECIENTE de América por *Drosophila subobscura*, una especie europea. Aunque se desconoce todavía cuál pudo ser la población originaria, los autores y sus colegas han demostrado que las poblaciones de Norteamérica y de Sudamérica proceden de la misma muestra inicial de colonizadores; dicho de otro modo, ambos procesos de colonización no son independientes. En Europa se da una clina latitudinal del tamaño corporal de los individuos: el tamaño de las moscas incrementa con la latitud. Existían indicios que hacían suponer una clina latitudinal para el tamaño en las poblaciones colonizadoras de Norteamérica, equivalente a la europea. La presunción se ha convertido en realidad observada. De lo que se desprende, además, la rápida adaptación a escala intercontinental y el carácter predecible de las trayectorias evolutivas. La investigación se ha centrado ahora en la búsqueda de una clina similar del tamaño en las poblaciones colonizadoras de Sudamérica.





2. DIMENSIONES DEL ALA (anchura y longitud) de ocho poblaciones británicas y una de Barcelona de *Drosophila subobscura*, en relación con la isoterma de julio de las Islas Británicas. Se observa que las dimensiones del ala disminuyen en las islas Británicas de acuerdo con la distribución geográfica. La muestra de Barcelona posee unas medias muy inferiores a los valores mínimos de las poblaciones británicas. Esta relación entre un factor climático de la importancia de la temperatura y el tamaño del ala (que guarda una estrecha correlación con el tamaño del cuerpo) sugiere que dicho carácter tiene un valor adaptativo. En la figura de la izquierda se dan los valores, en milímetros, de la anchura del ala, y en la de la derecha, los de la longitud. Los grados se dan en la escala Fahrenheit.

parásito (*Stercorarius parasiticus*), del que existen dos formas, una clara y otra oscura. La frecuencia de la forma clara pasa gradualmente de un 25 % a un 75 % a medida que nos aproximamos al polo norte. Julian Huxley denominó clinas a dichas gradaciones geográficas de caracteres fenotípicos.

Estas gradaciones pueden producirse por un efecto histórico, es decir, por migración de distintos individuos a partir del centro de origen de un gen. Así ha ocurrido, según parece, con la frecuencia del grupo sanguíneo B de la especie humana, clina cuyo máximo se encuentra en Asia central. En otras ocasiones, las clinas proporcionan información sobre la intensidad de la selección natural. Pensemos, por ejemplo, en el incremento de la coloración de la piel conforme nos acercamos a los trópicos. La clina en cuestión puede estar causada por la selección natural, debido al efecto protector de la pigmentación frente a la radiación solar. Dicho de una manera general, la clina puede estar determinada por la selección, que privilegia un fenotipo o genotipo en una parte del hábitat de una especie y favorece otros fenotipos o genotipos en otras partes de su área de distribución.

El estudio de las clinas constituye uno de los métodos para descubrir la acción de la selección en las poblaciones naturales. La variación geográfica de la selección comporta una correlación entre los caracteres y sus factores selectivos. Podemos también conocer la existencia de selección en las poblaciones naturales mediante la comparación de caracteres entre especies simpátricas (especies que conviven en una misma área por ser compatibles en sus exigencias bióticas), estrechamente emparentadas. Es probable que los caracteres homólogos de las especies simpátricas estén afectados por los mismos tipos de selección. Si las especies no compiten, es de esperar que exista una correlación entre las distribuciones de los caracteres homólogos. Si lo hacen, se producirá un desplazamiento de los caracteres. En el primer caso se espera que sus caracteres homólogos respondan de la misma manera frente al ambiente común, lo que da lugar a una variación geográfica similar y paralela. Esto origina fuertes correlaciones entre especies respecto a toda una serie de caracteres. La similitud de respuesta depende del grado de homología de los caracteres de las especies comparadas.

Tasas evolutivas

¿A qué velocidad se produce el proceso evolutivo en la naturaleza? Las afirmaciones relativas a la rapidez de la evolución carecen de sentido si no se acota el término "rapidez". El ritmo de la evolución debe cuantificarse. John Haldane propuso el "darwin" como unidad de medida, utilizada por numerosos autores para comparar las tasas evolutivas de una amplia variedad de taxones, sobre todo de organismos fósiles. Se emplea también en el debate en torno a la compatibilidad de la microevolución (evolución intraespecífica o intrapoblacional) con la macroevolución (evolución transespecífica). No cabe duda de que, en el futuro, una de las aplicaciones del cálculo de las tasas evolutivas será la determinación del impacto potencial de las alteraciones ambientales producidas por el hombre. Importará, en particular, averiguar si las poblaciones o especies pueden responder con la celeridad necesaria a los cambios de las presiones selectivas para evitar su extinción. Los intervalos de tiempo considerados en el marco de la microevolución oscilan entre una generación y muchos miles de años. Aquí nos centraremos en procesos microevolutivos que han tenido lugar en épocas recientes y a pequeña escala (menor que unos centenares de años), un área de investigación en creciente desarrollo. A ese tipo de microevolución se la denomina "contemporánea".

La investigación puede optar por comparar los valores de los caracteres de una misma población en distintos períodos de tiempo ("estudio alocrónico") o centrarse en la comparación de poblaciones actuales con un antepasado remoto común ("estudio sincrónico"). Los métodos alocrónicos resultan apropiados para inferir las tasas evolutivas. Durante más de 25 años los Grant estudiaron el tamaño del cuerpo y del pico de los pinzones de las islas Galápagos. El archipiélago sufrió una intensa sequía, entre 1976 y 1977, que redujo la abundancia de semillas pequeñas y blandas; la selección natural operó entonces favoreciendo a los pinzones con picos grandes, con el consiguiente incremento del tamaño promedio de estos caracteres. En 1983, como resultado de un episodio de El Niño, se dio un promedio de precipitación 10 veces mayor al máximo de los registros anteriores, que trajo consigo una gran abundancia de semillas pequeñas y blandas; la selección primó en esta ocasión a los pájaros con picos pequeños. Resultado de ello, el tamaño del cuerpo y del pico volvió a disminuir rápidamente hasta los niveles anteriores a 1976.

Ritmo y predicción

Además de la cuestión sobre las tasas de evolución, cabe preguntarse hasta qué punto las trayectorias evolutivas son *predecibles* o son idiosincrásicas. Obtener datos sobre esos dos puntos resulta fundamental para *predecir* las respuestas evolutivas frente a causas naturales o frente a perturbaciones del entorno producidas por el hombre. Los investigadores, que acostumbran calcular las tasas de evolución ciñéndose a los cambios fenotípicos que se manifiestan en poblaciones locales a lo largo del tiempo, raramente analizan el fenómeno a escala continental. Para determinar el carácter predecible de las trayectorias evolutivas, observan si las poblaciones replicadas presentan respuestas convergentes. Ahora bien, las especies de introducción reciente en un nuevo hábitat y que colonizan con suma presteza grandes áreas ofrecen una oportunidad única para estudiar tanto la velocidad de la evolución como el carácter predecible de su trayectoria. Dicho de otro modo, la rapidez y la predicción del curso evolutivo quedan demostrados si las poblaciones introducidas desarrollan prontamente clinas que convergen con las existentes en las poblaciones ancestrales. Pero, ¿cómo encontrar respaldo observacional a ese guión teórico?

Los autores y otros colegas suyos han hallado un candidato ideal para ese tipo de estudios. Se trata de la especie *Drosophila subobscura*, originaria de la región paleártica, que ha colonizado recientemente extensas zonas del continente americano. La especie se observó primero en América del Sur, en Puerto Montt (Chile). Ocurrió en febrero de 1978. Hoy, su área de distribución en Sudamérica abarca desde 29º hasta 53º S y del Pacífico al Atlántico; según parece, no ha arraigado en zonas más meridionales. En Norteamérica, la especie se detectó por primera vez en 1982, en Port Townsend (48º N), situado en la costa norte del estado de Washington. La mosca despliega su área de distribución desde Port Hardy (Columbia Británica) hasta Ojai (100 km al noreste de Los Angeles). Con exactitud, no se conoce todavía su límite oriental de distribución en América del Norte. Lo mismo en Norteamérica que en Sudamérica *D. subobscura* ha prosperado mucho en amplias zonas de su área de distribución.

Esos dos episodios de colonización, casi simultáneos, ofrecen una oportunidad excepcional para llevar a cabo estudios evolutivos. Hasta ahora no se había podido investigar ningún proceso de colonización desde su inicio y, además, con dos réplicas a escala continental. Entre otros aspectos de interés, el proceso ha puesto de manifiesto el carácter adaptativo del polimorfismo cromosómico para inversiones de esta mosca y de los genes que controlan su tamaño corporal. Y lo que encierra no menor calado teórico, se han podido cuantificar las tasas evolutivas del proceso y analizado el carácter predecible o contingente de las trayectorias evolutivas.

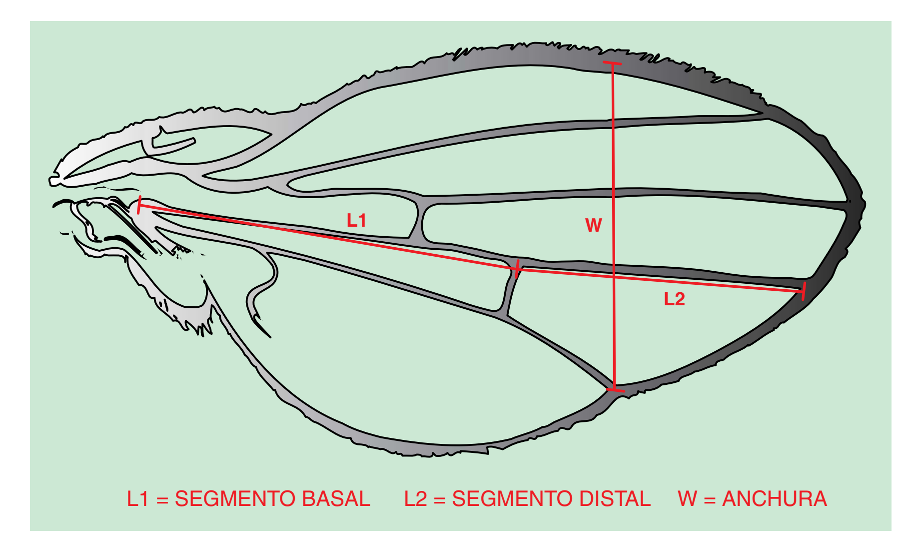
Polimorfismo cromosómico: clinas y adaptación

Desde un punto de vista genético, *D. subobscura* se caracteriza por sus numerosas inversiones cromosómicas. El cariotipo de la especie consta de cinco pares de cromosomas acrocéntricos (con un brazo largo y otro muy corto) y un par de cromosomas puntiformes. Los acrocéntricos presentan polimorfismo por inversiones. Como casi no se detecta recombinación en los heterocariotipos (cuyos cromosomas homólogos son portadores de inversiones diferentes), los genes contenidos en dichas inversiones suelen estar coadaptados. La coadaptación define el proceso por el que varios genes que interactúan de forma favorable se acumulan en el acervo génico de la población.

En *D. subobscura*, cada ordenación cromosómica actúa como un supergén, lo que confiere a los individuos una notable flexibilidad adaptativa. Para cada tipo de ambiente, dentro de los intervalos tolerados por la especie, existiría, en principio, un subconjunto idóneo de ordenaciones cromosómicas que maximizaría la capacidad de adaptación de los individuos de la población a dicho entorno. De manera que, en el caso de *D. subobscura*, el polimorfismo cromosómico por inversiones constituiría un mecanismo genético de adaptación rápida al ambiente. Por otro lado, la capacidad reproductora de la especie no



3. LOCALIZACION GEOGRAFICA de las poblaciones europeas de *Drosophila subobscura* y *Drosophila obscura* analizadas para estudiar la clina respecto al tamaño general del cuerpo. Los círculos azules corresponden a las poblaciones de *obscura* y los rojos a las poblaciones de *subobscura*.



4. MEDIDAS DEL ALA analizadas en las poblaciones europeas de *Drosophila subobscura* y *Drosophila obscura* y en las poblaciones colonizadoras de *D. subobscura*.

se ve mermada por la existencia de un grado de polimorfismo tan elevado. En *Drosophila*, los núcleos que contienen cromosomas resultantes de un entrecruzamiento en la región de la inversión, en los heterocariotipos, no forman parte del núcleo del oocito; además, en los machos no existe recombinación.

Las primeras gradaciones o clinas detectadas en las poblaciones colonizadoras de América de *Drosophila subobscura*, convergentes con las existentes en la región paleártica de origen, corresponden a las frecuencias de determinadas ordenaciones cromosómicas. El análisis de las frecuencias de ordenaciones cromosómicas en las poblaciones colonizadoras de América ha permitido demostrar el carácter adaptativo del polimorfismo observado. En un primer trabajo se detectaron ya clinas latitudinales significativas de las frecuencias de determinadas ordenaciones cromosómicas en nueve poblaciones chilenas. Se comprobó que esas clinas guardaban estrecho parecido con las existentes en Europa. Observación que, por sí sola, constituía ya un sólido respaldo a la tesis del carácter adaptativo de las clinas y, por tanto, de que éstas eran consecuencia de la selección natural. Algunos autores sostenían que las clinas latitudinales de Europa obedecían quizás a factores históricos, combinados con la migración y el flujo genético. Pero la similitud entre éstas y las clinas observadas en las poblaciones coloni-

Las unidades de la evolución

La estima de una tasa de evolución halla su equivalente mecánico en el cálculo de la pendiente de una recta de regresión de los valores del carácter en función del tiempo. Hace más de 50 años, John Haldane, especulando en torno a posibles unidades para cuantificar las tasas de evolución, ideó el "darwin", equivalente ahora a una milésima de variación del promedio de un carácter en mil años. ¿Cómo se obtiene?

Supongamos que en el tiempo *t* la longitud promedio de una estructura ha incrementado desde el valor x_1 al valor x_2; entonces, el valor promedio de la tasa de cambio proporcional,

$$\frac{1}{x}\frac{dx}{dt}$$

es decir

$$\frac{d}{dt}(\ln x)$$

es

$$\frac{\ln x_2 - \ln x_1}{t}$$

Así, para estimar una tasa evolutiva en darwin basta con tomar el logaritmo natural (ln) del valor del carácter en un momento determinado (o en una población determinada), restarle el logaritmo natural del valor del mismo carácter en otro momento en el pasado (o en otra población) y dividir el resultado por el valor del tiempo en millones de años. Por ejemplo, si la longitud de un diente se dobla en un período de 10 millones de años, entonces el logaritmo natural incrementa en 0,693 y su longitud promedio incrementa según un factor de $1 + 0{,}693 \times 10^{-7}$. El valor 7×10^{-8} puede considerarse como una medida de la tasa evolutiva de este carácter.

Otra unidad avanzada por Haldane tiene en cuenta la cantidad de variación del carácter. En este caso, la magnitud del cambio se divide por la cantidad de variación del carácter. A esa unidad Gingerich la denominó "haldane", que se define mediante la siguiente expresión:

$$h = \frac{\frac{x_2}{S_p} - \frac{x_1}{S_p}}{g}$$

donde x_2 y x_1 representan los valores medios del carácter en cada una de las dos poblaciones (modelo sincrónico) o en una población en dos períodos diferentes (modelo alocrónico); s_p se define mediante:

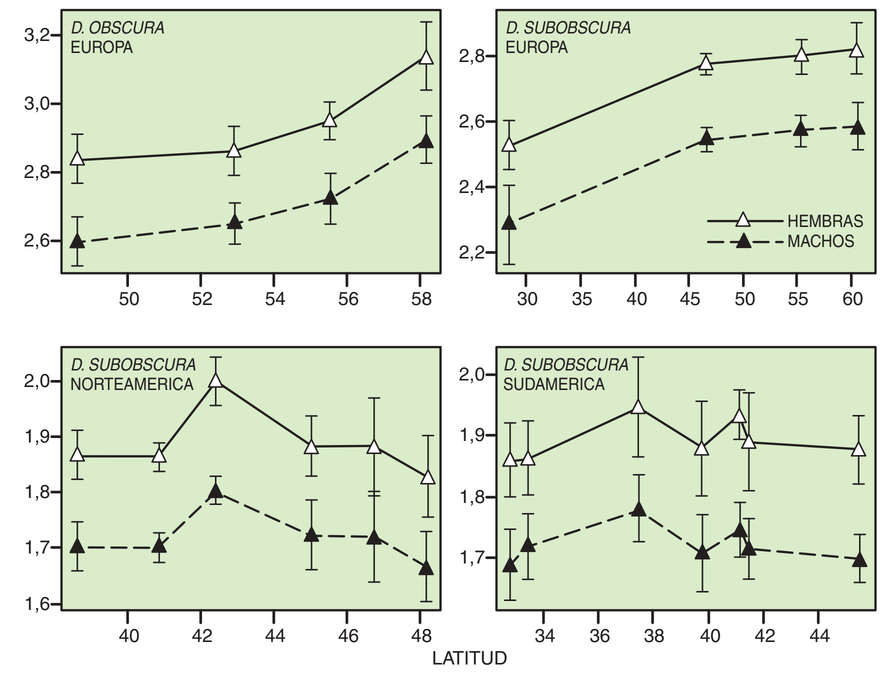
$$S_p^2 = \frac{SS_1 + SS_2}{n_1 + n_2 - 2}$$

donde SS_1 y SS_2 son las sumas de cuadrados, n_1 y n_2 los tamaños muestrales y *g* es el número de generaciones que separan a las poblaciones o las muestras.

En muchos caracteres, especialmente los morfológicos, las desviaciones típicas incrementan con la media (el coeficiente de variación se mantiene relativamente constante). Los datos deben transformarse tomando logaritmos naturales.

zadoras pone en difícil aprieto esa hipótesis.

Los datos del polimorfismo cromosómico de las poblaciones chilenas indican que la respuesta a la selección natural ha sido muy rápida; en sólo cinco años se habían establecido ya gradaciones geográficas para las frecuencias de determinadas ordenaciones cromosómicas. Se comprobó la evolución de la clina a raíz del seguimiento a que se sometió la mosca. Siete de las poblaciones chilenas que se analizaron en 1981 volvieron a muestrearse en 1986, y se observó un incremento general de los valores de los coeficientes de correlación entre las frecuencias de ordenaciones cromosómicas y la latitud con respecto a 1981. También en Norteamérica se han detectado clinas para las frecuencias de la mayoría de las ordenaciones cromosómicas que presentan clinas en Sudamérica.



5. REPRESENTACION GRAFICA de la media del índice del tamaño general del cuerpo (Z), con su error estándar, en función de la latitud. Se ha realizado un análisis de componentes principales, utilizando las variables continuas L1 (longitud del segmento basal de la vena IV del ala), L2 (longitud del segmento distal de la vena IV del ala), W (anchura del ala) y TL (longitud de la tibia). La primera componente principal, Z, explica al menos el 68 % de la variabilidad observada y puede considerarse un índice del tamaño general del cuerpo. En las poblaciones europeas, tanto de *D. subobscura* como de la especie próxima *D. obscura*, el índice Z presenta una regresión positiva significativa con respecto a la latitud. Sin embargo, en las poblaciones colonizadoras de América, el coeficiente de regresión del índice Z respecto a la latitud no difiere significativamente de cero.

Clinas del tamaño del cuerpo

Hace 45 años, uno de los autores (Prevosti) descubrió que, en poblaciones naturales europeas, el tamaño corporal de *Drosophila subobscura* guardaba una correlación negativa con la isoterma de julio. Estudió muestras de siete poblaciones británicas, una irlandesa y una población española (de Barcelona). De cada población, analizó los descendientes de segunda generación (F_2) de 10 hembras capturadas en la naturaleza, para evitar, en lo posible, los efectos condicionados por el ambiente. De cada F_2 midió anchura y longitud del ala de 10 machos y 10 hembras. Y demostró que las diferencias relativas al tamaño del cuerpo tenían una base genética.

Los datos de Prevosti demostraban que, en las islas Británicas, la anchura y la longitud del ala disminuían según la isoterma de julio. La muestra de Barcelona poseía unos valores medios muy inferiores a los mínimos observados en las poblaciones británicas. Esta relación entre un factor climático tan importante como la temperatura (recuérdese, la isoterma de julio) y el tamaño del ala (que evidencia una estrecha correlación con el tamaño del cuerpo) le indujo a atribuir a ese rasgo alar una función adaptativa. Andando el tiempo, otros autores obtuvieron resultados similares, lo que demostraba que se trataba de un fenómeno generalizado.

Conocida la colonización americana de *D. subobscura*, se plantearon nuevas cuestiones. Se abordó la posibilidad de que las poblaciones allí desarrolladas presentaran clinas latitudinales significativas de algunos caracteres morfométricos cuantitativos (por ejemplo, el tamaño del cuerpo). Y, ligada con la anterior, la posibilidad de que dichos caracteres reflejaran la misma respuesta adaptativa rápida que se había comprobado en las ordenaciones cromosómicas.

De acuerdo con los análisis de las poblaciones europeas realizados por Prevosti y otros autores, ciertas dimensiones del cuerpo se hallaban correlacionadas con la temperatura o la latitud. Además, la clina para dicho carácter observada en Europa tenía probablemente un significado adaptativo. Para demostrarlo, los autores (Prevosti y Serra), junto con otros investigadores, diseñaron un experimento basado en uno de los métodos propuestos por Endler para detectar la selección en poblaciones naturales: si en dos especies próximas se descubre un patrón de variación geográfica concordante, respecto a un carácter homólogo, puede atribuirse dicha pauta a la función adaptativa del rasgo en cuestión.

Con ese propósito, se capturaron muestras de cuatro poblaciones europeas de *Drosophila subobscura* y de *D. obscura*, representativas de casi toda el área de distribución de ambas especies en Europa. Se siguió el mismo procedimiento experimental adoptado por Prevosti en 1955. De cada población se analizaron un total de 100 machos y 100 hembras. Y de ambos sexos se estudiaron cuatro variables continuas: la longitud del segmento basal (L1) y la longitud del segmento distal (L2) de la IV vena longitudinal ($L = L1 + L2$) del ala, la anchura del ala (W) desde el extremo de la quinta vena hasta el borde de la costal, en dirección perpendicular a la tercera vena, y, por último, la longitud de la tibia (TL). Para obtener un índice general del tamaño del cuerpo (*Z*), se realizó un análisis de componentes principales con las variables L1, L2, W y TL, que se hallan estrechamente correlacionadas. Sólo se obtuvo una

a

D. obscura: Europa

	Pendiente	t	p
L	0,0283	10,9463	0,0000***
W	0,0215	9,2366	0,0000***
TL	0,0038	7,1716	0,0000***
Z	0,0301	10,3574	0,0000***

D. subobscura: Europa

	Pendiente	t	p
L	0,0081	12,6307	0,0000***
W	0,0072	13,4551	0,0000***
TL	0,0019	7,5829	0,0000***
Z	0,0094	13,4694	0,0000***

b

D. subobscura: Norteamérica

	Pendiente	t	p
L	-0,0049	-2,1410	0,9828
W	-0,0003	-0,2669	0,6050
TL	-0,0019	-3,4149	0,9996
Z	-0,0035	1,8061	0,0367

D. subobscura: Sudamérica

	Pendiente	t	p
L	0,0012	0,7568	0,2252
W	0,0006	0,9116	0,1818
TL	0,0003	0,7505	0,2271
Z	0,0011	0,8493	0,1986

L = Longitud del ala W = Anchura del ala TL = Longitud de la tibia Z = Indice del tamaño general del cuerpo

Pendientes de las rectas de regresión de varios caracteres respecto a la latitud. En la parte superior de la tabla (*a*) se indican los valores correspondientes al grupo de poblaciones europeas de *Drosophila obscura* y de *D. subobscura*; en la parte inferior (*b*), el grupo de poblaciones americanas de *D. subobscura*. Los datos nos revelan que en las poblaciones europeas se han establecido ya clinas para el tamaño del cuerpo en ambas especies simpátricas. No se detectan, sin embargo, clinas en las poblaciones colonizadoras de *D. subobscura*.

Las estimas de las pendientes se obtuvieron mediante un análisis de la covarianza (ANCOVA), considerando el sexo como factor y la latitud como variable concomitante. Puesto que H_0: pendiente ≤ 0, H_1: pendiente > 0, el test *t* es de una cola. Los asteriscos indican el nivel de significación después de aplicar el ajuste secuencial de Bonferroni a los valores *p* de la tabla. Los ajustes secuenciales de Bonferroni han sido $\alpha = 0{,}05$, $p < 0{,}0367$; $\alpha = 0{,}01$, $p < 0{,}01$; $\alpha = 0{,}001$, $p < 0{,}0002$.

componente principal que explicaba una varianza superior a la unidad. El valor propio correspondiente explicaba al menos el 68 % de la variabilidad mostrada por los especímenes. Además, los coeficientes de esta primera componente principal (*Z*) eran todos positivos, lo que demostraba que era una buena medida general del tamaño del cuerpo.

Con el fin de comprobar la existencia de clinas latitudinales para el tamaño del cuerpo en las poblaciones europeas (4 poblaciones de *D. subobscura* y 4 de *D. obscura*) y en las poblaciones de *D. subobscura* colonizadoras de América (6 norteamericanas y 7 sudamericanas), se realizó un análisis de la covarianza con los cuatro conjuntos de datos (Europa, Norteamérica y Sudamérica para *D. subobscura* y Europa para *D. obscura*). Se utilizaron las variables L, W, TL y Z, considerando el sexo como factor fijo y la latitud como variable concomitante para estimar la pendiente de la recta de regresión común. No se observaron diferencias significativas entre las pendientes de machos y hembras, en ninguno de los cuatro grupos de datos, lo que indicaba que el modelo utilizado era el apropiado. La existencia de una asociación positiva significativa entre el carácter estudiado y la latitud se determinó mediante el test *t* de una cola, aplicando la corrección secuencial de Bonferroni dentro de cada grupo de datos.

Los resultados demostraron de forma inequívoca que, en las poblaciones europeas, el tamaño (representado por las variables continuas) incrementaba con la latitud. Por contra, en las poblaciones colonizadoras de América debía aceptarse la hipótesis nula: en éstas no aparecían todavía clinas latitudinales significativas respecto a los caracteres cuantitativos analizados, aun cuando se tomara en cuenta el índice global del tamaño (Z). Los resultados eran equivalentes a los obtenidos en el caso de considerar cada variable continua por separado.

En síntesis, en este trabajo se detectaron clinas latitudinales significativas para los caracteres morfométricos estudiados en las poblaciones europeas de *Drosophila subobscura*, equivalentes a las encontradas en estudios anteriores. Se abordó, además, el posible carácter adaptativo de esas

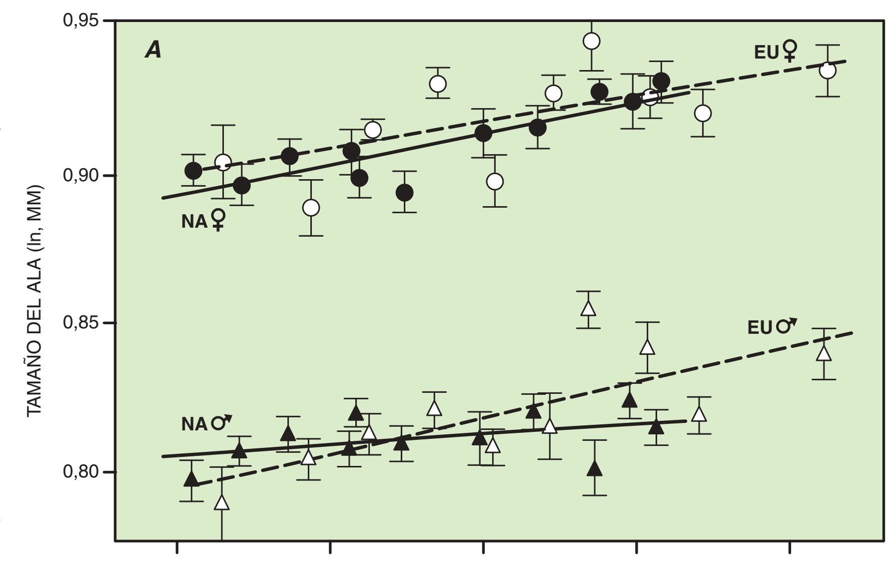
clinas, comparándolas con las de *Drosophila obscura*, especie simpátrica próxima a *D. subobscura*. Ambas presentaban una respuesta paralela para estos caracteres en función de la latitud. Ello apoyaba la idea de que las clinas observadas eran probablemente adaptativas, vinculadas a alguna variable climática.

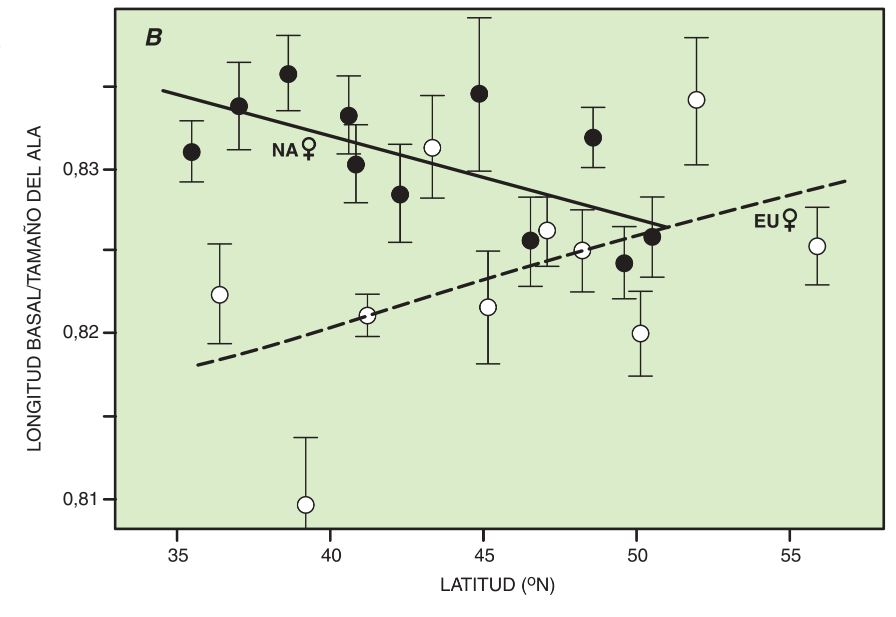
Sin embargo, no se pudieron detectar todavía clinas respecto al tamaño del cuerpo en las poblaciones colonizadoras de Norteamérica, ni en las de Sudamérica, transcurridos ya 10-15 años desde la colonización. Sí se habían descubierto, recuérdese, clinas de las frecuencias de algunas ordenaciones cromosómicas. La respuesta adaptativa de los genes que controlan el tamaño del cuerpo no se había producido con la celeridad con que lo habían hecho las ordenaciones cromosómicas. Para nuestro infortunio, no hay datos sobre los fenotipos determinados por las distintas ordenaciones cromosómicas, ni sobre los genotipos que controlan los caracteres morfométricos analizados.

La morfología podría evolucionar con mayor parsimonia si la intensidad de la selección para los caracteres morfométricos fuese más débil que para el fenotipo determinado por las ordenaciones cromosómicas. Y, aun cuando la intensidad de la selección fuese equivalente, la respuesta adaptativa podría diferir de un tipo a otro de caracteres, debido a una distinta relación entre el genotipo y el fenotipo respectivos.

Ahora bien, dado el posible carácter adaptativo del tamaño del cuerpo, cabía esperar que en un período no demasiado largo apareciesen también, en las áreas colonizadas, clinas latitudinales de caracteres cuantitativos relacionados con el tamaño del cuerpo. Así ocurrió. Uno de los autores (Serra), junto con otros colegas de la Universidad de Washington en Seattle, retomaron el estudio sobre la posible existencia de clinas latitudinales respecto al tamaño del cuerpo en poblaciones colonizadoras norteamericanas de *Drosophila subobscura*. Se capturaron individuos de 11 poblaciones colonizadoras de Norteamérica (Atascadero, Gilroy, Davis, Redding y Eureka en California; Medford y Salem en Oregón; Centralia y Bellingham en Washington y Peachland y Port Hardy en Columbia Británica) y también de 10 poblaciones europeas (Málaga, Valencia y Barcelona en España; Montpellier, Lyon, Dijon, Gif-sur-Yvette y Lille en Francia; Leiden en Holanda y Århus en Dinamarca).

La investigación se centró en el análisis de la longitud del ala (L = L1 + L2; suponía ésta la suma del segmento basal y el distal de la vena IV). En el caso de las hembras de las poblaciones europeas, y al igual que lo observado en estudios anteriores, la longitud del ala incrementaba de forma importante, significativa en el argot, en función de la latitud. La longitud del ala de las hembras de las poblaciones colonizadoras norteamericanas también aumentaba significativamente con la





6. CONVERGENCIA DE LA CLINA LATITUDINAL respecto al tamaño del cuerpo de las poblaciones norteamericanas de *D. subobscura* con la clina europea. El gráfico superior ilustra la longitud del ala de las hembras (transformación logarítmica, media ± desviación típica) de las poblaciones colonizadoras de Norteamérica (NA), que incrementa con la latitud de acuerdo con un patrón prácticamente idéntico al de las poblaciones europeas. En los machos el tamaño del ala también incrementa positivamente con la latitud en las poblaciones colonizadoras y en Europa. En el gráfico inferior se representa la longitud relativa del segmento basal de la vena IV (la transformación arcsen raíz cuadrada de la proporción respecto a la longitud total del ala) en función de la latitud (sólo hembras; los machos muestran una pauta similar). En las poblaciones nativas europeas la longitud relativa del segmento basal incrementa con la latitud, mientras que en las poblaciones colonizadoras disminuye con la latitud. Por consiguiente, el segmento del ala que controla la clina del tamaño del ala difiere en las poblaciones colonizadoras y las europeas.

latitud y la pendiente de la recta de regresión no difería significativamente de la de las hembras europeas. En el caso de los machos, la longitud del ala también crecía de manera notable en función de la latitud, en ambas poblaciones, europeas y norteamericanas. Si bien el valor de la pendiente en el caso de los machos colonizadores era inferior al valor de la pendiente de los machos europeos o al de las hembras norteamericanas.

Convergencia evolutiva

La convergencia de poblaciones colonizadoras y autóctonas en torno a la variación clinal del tamaño del ala se ha producido a través de cambios de las longitudes relativas de distintas partes del ala. En las poblaciones europeas, el incremento de la longitud alar con la latitud viene determinado por un alargamiento del segmento basal de la vena IV, mientras que en las poblaciones norteamericanas el incremento longitudinal del ala se debe al alargamiento del segmento distal de la vena IV.

Veinte años escasos se ha tardado en establecer clinas de caracteres cuantitativos a escala continental, un indicio de la rapidez con que pueden darse las tasas microevolutivas en ese rango. La tasa de divergencia de tamaños a escala continental para las hembras de *Drosophila subobscura* es de 1700 darwin y 0,011 haldane. Para los machos, los valores correspondientes son de 699 darwin y 0,004 haldane. Estos valores pueden considerarse altos al tratarse de tasas continentales de microevolución.

¿Qué decir de las trayectorias evolutivas? Si la fuerza de la selección natural resultara determinante, entonces las trayectorias evolutivas deberían ser predecibles; pero si el papel determinante competiera a acontecimientos singulares del pasado, entonces las trayectorias serían idiosincrásicas o "contingentes". Pues bien, de acuerdo con lo aquí observado y descrito, las clinas latitudinales de la longitud del ala, convergentes entre las poblaciones norteamericanas de *D. subobscura* y las poblaciones europeas, demuestran que la evolución de este carácter es predecible y se debe, probablemente, a la temperatura.

Sin embargo, los machos han evolucionado más lentamente que las hembras en las poblaciones norteamericanas, y las clinas europeas y americanas implican cambios en las longitudes relativas de distintos segmentos del ala. Así, aunque la respuesta adaptativa global (incremento de la longitud del ala en función de la latitud) sea predecible, no lo son los detalles subyacentes. En este sistema, pues, la evolución ha sido a la vez predecible y contingente.

Esta observación pone de relieve la idea de que el modo de actuar de la selección es comparable a un trabajo de bricolaje. Para construir las nuevas características, echa mano de la variabilidad de que dispone en cada momento. Estrategia que se halla en buen acuerdo con la aleatoriedad de las mutaciones y con la comparación de la evolución biológica con un proceso de acumulación de conocimiento por tanteo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GEOGRAPHICAL VARIABILITY IN QUANTITATIVE TRAITS IN POPULATIONS OF *DROSOPHILA SUBOBSCURA*. A. Prevosti. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol*., vol. 20, págs. 294-298; 1955.

NATURAL SELECTION IN THE WILD. J. A. Endler. Princeton University Press, 1986.

COLONIZATION OF AMERICA BY *DROSOPHILA SUBOBSCURA*: EXPERIMENT IN NATURAL POPULATIONS THAT SUPPORTS THE ADAPTIVE ROLE OF CHROMOSOMAL-INVERSION POLYMORPHISM. A. Prevosti, G. Ribó, Ll. Serra, M. Aguadé, J. Balañà, M. Monclús y F. Mestres, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*., vol. 85, págs. 5597-5600; 1988.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF EVOLUTION IN PROGRESS: CLINES FOR QUANTITATIVE TRAITS IN COLONIZING AND PALEARCTIC POPULATIONS OF *DROSOPHILA*. G. Pegueroles, M. Papaceit, A. Quintana, A. Guillén, A. Prevosti y Ll. Serra, en *Evolutionary Ecology*, vol. 9, páginas 453-465; 1995.

PERSPECTIVE: THE PACE OF MODERN LIFE: MEASURING RATES OF CONTEMPORARY MICROEVOLUTION. A. P. Hendry y M. T. Kinisson, en *Evolution*, vol. 53, págs. 1637-1653; 1999.

RAPID EVOLUTION OF A GEOGRAPHIC CLINE IN SIZE IN AN INTRODUCED FLY. R. B. Huey, G. W. Gilchrist, M. L. Carlson, D. Berrigan y Ll. Serra, en *Science*, vol. 287, págs. 308-309; 2000.

Decisiones racionales

Ciertas herramientas matemáticas apropiadas para la toma de decisiones en medicina y en la industria podrían mejorar el diagnóstico y salvar vidas

John A. Swets, Robyn M. Dawes, John Monahan



1. LOS DIAGNOSTICOS DICOTOMICOS abundan, no sólo en medicina, sino también en muchos otros campos. Los autores demuestran que hay técnicas de probada utilidad para incrementar las probabilidades de acierto infrautilizadas, con indudable riesgo.

El médico se debate ante una mamografía, indeciso sobre la naturaleza, tumoral o no, de una mancha opaca. ¿Procede la cirugía? El técnico de aeropuerto está preocupado por una imagen anormal tras una inspección por ultrasonidos del avión. ¿Indica acaso una fisura inquietante?

Ambos se enfrentan a decisiones relacionadas con un diagnóstico. A pesar de que los datos de que disponen son incompletos o incluso ambiguos, deben decidir si se da (o se dará) una determinada circunstancia. Son problemas frecuentes en la asistencia sanitaria, la seguridad pública, los negocios, el entorno, la justicia, la educación, la industria, el procesamiento de información, el ejército y el gobierno. Y las consecuencias pueden ser graves. En muchos casos, un dictamen equivocado puede suponer la muerte de personas.

Por sorprendente que parezca, el proceso de toma de decisiones relacionado con el diagnóstico viene a coincidir, cualquiera que sea el dominio de aplicación. Los métodos que mejoran el proceso en un área benefician a otras. Se conocen al menos dos métodos con estas características. Duro es decirlo, pero resultan harto desconocidos o no utilizados. El primero aumenta la precisión y la probabilidad de que la decisión que se tome sea la más adecuada. El otro mejora la utilidad de la decisión de forma que el número de casos en los que se acierta tenga un coste razonable, en términos de diagnósticos falsamente positivos. Ambos son métodos estadísticos y conciernen, pues, a numerosos individuos. Sin embargo, no deben asustarse los alérgicos a la matemática, pues la lógica en que se basan es sumamente sencilla.

No se pretende reducir a los profesionales del diagnóstico a esclavos de las fórmulas matemáticas. En según qué medios, como la medicina

clínica o la predicción meteorológica, donde intervienen múltiples factores, los útiles estadísticos objetivos constituyen una 'segunda opinión', que informa al profesional, sin asumir el rango de última palabra. Por contra, hay otros campos en los que el análisis estadístico resulta con frecuencia más preciso que los juicios subjetivos, aunque provengan de experimentados profesionales.

Nos ceñiremos a diagnósticos que requieren una decisión entre dos únicas opciones: sí o no (¿es o no un tumor? ¿es o no defectuosa el ala del avión?). Evidentemente el mundo está lleno de problemas que implican un abanico más amplio de opciones, pero son muy frecuentes decisiones importantes del tipo sí/no.

Herramientas del oficio

Si las pruebas diagnósticas ofrecieran siempre respuestas directas, sobrarían las herramientas de ayuda a la decisión. Pero los resultados en bruto de las pruebas precisan interpretación. A modo de ejemplo, para detectar si una persona padece glaucoma, una enfermedad que produce pérdida de visión al dañar el nervio óptico y otras partes del ojo, se mide la presión de los elementos dentro del globo ocular. Un valor de presión muy bajo es claramente indicativo de que el ojo está sano, de la misma forma que uno muy elevado implica la presencia de glaucoma. Pero, ¿qué decir cuando los valores son intermedios?

La estadística permite arrojar algo de luz en esa zona incierta. Supongamos que la presión intraocular es la única medida de que se dispone para diagnosticar el glaucoma. Supongamos también que una presión por debajo de 10 en la escala de medida al uso siempre significa ausencia de glaucoma, que valores superiores a 40 siempre son indicativos de la enfermedad y que los valores entre 10 y 40 pueden observarse lo mismo en ojos sanos que en ojos enfermos.

Para manejar esta incertidumbre, los analistas identifican primero una población grande de individuos cuyos valores de presión intraocular sean conocidos. Luego, con independencia de lo anterior, se determinan qué sujetos padecen problemas de visión propios del glaucoma y cuáles no. Así podrían calcular cuál es la probabilidad de padecer glaucoma para cualquier valor posible de presión intraocular. A partir de esas probabilidades (y de otras consideraciones que se comentarán a continuación), se fijará un punto de corte razonable o umbral diagnóstico: los valores superiores o iguales a ese umbral llevarían asociado un diagnóstico positivo ("el individuo padece glaucoma") y los valores inferiores, un diagnóstico negativo ("no padece glaucoma").

Naturalmente, las pruebas diagnósticas simples son menos informativas que las que combinan varias. Para potenciar la precisión del diagnóstico, se pueden combinar los resultados de varias pruebas simples que aporten una información única, concediendo mayor peso a las mediciones más predictivas de la condición sometida a estudio. Los algoritmos matemáticos que especifican las mejores pruebas a incluir en el diagnóstico y que calculan la probabilidad de la presencia de una condición, basados en resultados combinados, se conocen como reglas estadísticas de predicción.

Los datos totalmente objetivos, así la presión intraocular, no son los únicos que pueden emplearse para aumentar la precisión de las reglas estadísticas de predicción. Las impresiones subjetivas también admiten cuantificación. Se pueden objetivar, por ejemplo, mediante una lista explícita de criterios perceptibles (como el tamaño y la regularidad de una imagen posiblemente tumoral), que se juzgarán de acuerdo con una escala de 1 a 5.

Si se dispone de más de una regla de predicción estadística, quien deba tomar la decisión ha de considerar cuáles son las más apropiadas. Y esto también se puede hacer de forma objetiva. La precisión global de una regla de predicción se puede evaluar revisando las llamadas curvas características operativas para el receptor (COR). Estas curvas nacieron en la Segunda Guerra Mundial para determinar la fiabilidad discriminante de los radares a la hora de distinguir entre interferencias aleatorias (ruido) y señales reales de la presencia de aviones enemigos.

Los programas que generan las curvas COR evalúan las implicaciones de tomar un valor determinado como umbral diagnóstico de una prueba o de un conjunto de ellas para tomar una decisión del tipo sí/no. ¿Qué porcentaje de individuos afectados serán correctamente clasificados como enfermos (verdaderos positivos o aciertos)? ¿Qué porcentaje de individuos sanos serán clasificados de forma errónea como enfermos (falsos positivos o falsas alarmas)?

Para cada valor escogido como potencial umbral diagnóstico, el programa traza la curva de verdaderos positivos en función de los falsos negativos. El resultado es una curva monótona que va desde la esquina inferior izquierda, en la que ambos porcentajes son igual a cero, hasta la esquina superior derecha, donde ambos valores son del cien por cien. Cuanto mayor sea la curvatura de la función, mayor resultará la precisión de la regla de decisión, porque mayor es el número de aciertos en relación con el de falsas alarmas.

Hay otros resultados posibles, además de resultados verdaderos positivos y falsos positivos. Un diagnóstico binario basado en cualquier umbral también genera verdaderos negativos (individuos correctamente clasificados como sanos) y falsos negativos o fallos (individuos enfermos no detectados). Ambos son porcentajes complementarios de los anteriores y pueden ignorarse en la construcción de las curvas COR. Un porcentaje de verdaderos positivos del 80 por ciento, automáticamente supone un porcentaje de falsos positivos o fallos del 20 por ciento.

Dado que existen pocos métodos diagnósticos absolutamente infalibles en la clasificación de los individuos como sanos o enfermos, las instituciones deben decidir sobre la importancia de detectar todos o casi todos los verdaderos positivos, pues ello se hace a costa de incrementar el número de falsos positivos o falsas alarmas. Necesitan, pues, determinar el umbral más razonable en una situación dada.

Volvamos al ejemplo del glaucoma. Los clínicos que se fijaran sólo en la presión intraocular detectarían la mayoría de los casos de glaucoma escogiendo un umbral muy blando, digamos 10. Después de todo la muestra estudiada revelaba que todos los pacientes con glaucoma tenían una presión intraocular mayor de 10. Pero este umbral también implicaría clasificar como enferma a mucha gente que está sana, de forma que recibirían el doble e innecesario impacto de preocupación y tratamiento. Para reducir el número de tales errores podrían entonces escoger un umbral mucho más estricto, por ejemplo una presión intraocular de 35. Muy pocas personas sanas quedarían así clasificadas como afectas de glaucoma, pero un criterio tan restrictivo dejaría escapar más de

la mitad de los casos de glaucoma, negándoles el tratamiento.

Para fijar un umbral, los encargados de tomar la decisión deben sopesar tales eventualidades, como las consecuencias de fallos y de falsas alarmas, así como la prevalencia del problema en la población a la que se quiere aplicar. Afortunadamente se han desarrollado reglas generales y ayudas matemáticas para encontrar el umbral óptimo. Por ejemplo, la elevada prevalencia de un problema o un considerable beneficio asociado a la detección de verdaderos positivos inclinan a optar por un criterio laxo, mientras que una baja prevalencia y un elevado coste de cada falsa alarma reclaman un criterio más estricto (consideraciones éticas aparte).

Aunque las reglas estadísticas de diagnóstico y las curvas COR están frecuentemente infrautilizadas por los encargados de efectuar el diagnóstico, abundan los ejemplos de su valía en la vida diaria. En el campo de la psiquiatría hallamos una de sus aplicaciones más impresionantes.

De manera creciente, se solicita a psiquiatras y psicólogos clínicos que determinen las posibilidades de que individuos internados o perturbados se tornen violentos. Es necesario identificar a las personas más propensas a amenazar la seguridad de los demás, por su propio bien y por el de la sociedad. Al mismo tiempo, se reconoce inaceptable el entrometerse en la vida de las personas que no necesitan esta ayuda.

Contra lo que cabía esperar, en 1993, el estudio más complejo de evaluación clínica por métodos estadísticos presentó una clamorosa falta de precisión: el diagnóstico establecido por los médicos que examinaban las personas que acudieron a un servicio de urgencias de un gran hospital psiquiátrico se habían equivocado en uno de cada dos diagnósticos, como si hubiera decidido el azar. Dicho de otro modo, los psiquiatras de urgencias no pudieron prever, en absoluto, quiénes entre los pacientes cometerían actos violentos en los seis meses siguientes.

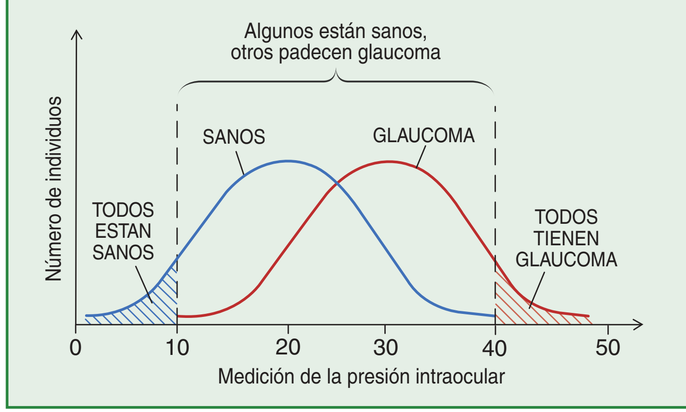
Tras ese fiasco, los bioestadísticos desarrollaron métodos de predicción para determinar la probabilidad de cometer actos violentos. Uno de los que mejor se han estudiado es la Guía para la Valoración del Riesgo de Violencia, que mide doce variables, entre ellas, la presencia de una serie de rasgos indicativos de psicopatía y el estudio de problemas de adaptación en educación básica.

Para demostrar su capacidad de predicción de actos violentos en años sucesivos, se estudió a una serie de criminales dados de alta en un hospital de máxima seguridad, de forma que

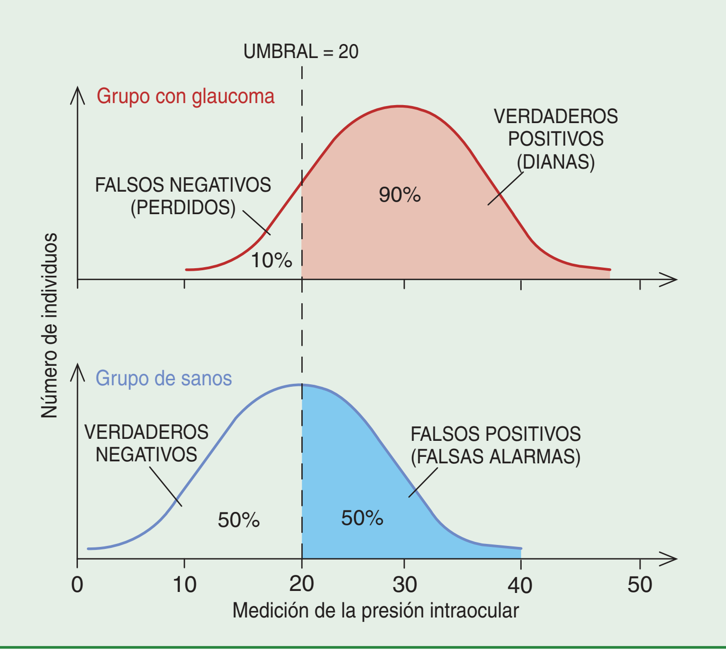
Etapas para tomar una mejor decisión

¿Cómo puede el médico asegurarse de que las pruebas diagnósticas que emplea son las más exactas y proporcionan los mejores resultados en la discriminación entre individuos portadores de una enfermedad y exentos de la misma? Un método importante es la construcción de curvas COR (característica para el operador receptor). Este método se entenderá mejor mediante un ejemplo. Imaginemos los pasos de un análisis que evalúa la precisión del diagnóstico de glaucoma a partir de una medida de la presión intraocular de los pacientes.

PASO 1: Encuéntrese una muestra grande de personas cuyas presiones intraoculares y estado de salud respecto al glaucoma sean conocidos. Sepárense los sanos de los enfermos y dibújense las respectivas gráficas que muestran el número de individuos para cada nivel de presión. El gráfico de esta población hipotética revela que presiones comprendidas entre 10 y 40 no permiten determinar de modo fiable si la persona está o no afectada de glaucoma.



PASO 2: Calcúlese la probabilidad de que un diagnóstico afirmativo, a partir de un valor igual o superior a un umbral prefijado de presión, sea correcto para un paciente nuevo. Encuéntrense estas probabilidades determinando la proporción de pacientes de esa muestra de la población a la que se habría diagnosticado de forma acertada si se hubiera aplicado tal criterio. En la figura inferior, el área bajo las curvas presenta el cien por ciento de cada población. Si el umbral de presión intraocular fuera de 20, el 90 por ciento de la población que tuviera glaucoma sería diagnosticada de forma acertada (verdaderos positivos) y el 50 por ciento de los sanos recibirían el diagnóstico incorrecto de glaucoma (falsos positivos).



los individuos quedaron clasificados en dos categorías de riesgo: bajo y alto. El 55 por ciento de los considerados de alto riesgo cometieron actos violentos, por sólo un 19 por ciento en los de riesgo bajo, una precisión muy por encima del azar. Aún otra regla estadística de decisión obtuvo mejores resultados en la predicción de la violencia en pacientes dados de alta en instituciones psiquiátricas. Sin embargo, las partes implicadas discuten todavía si la clasificación debería ser la dictada por las reglas de decisión o si dejar que la clínica las empleara de forma auxiliar.

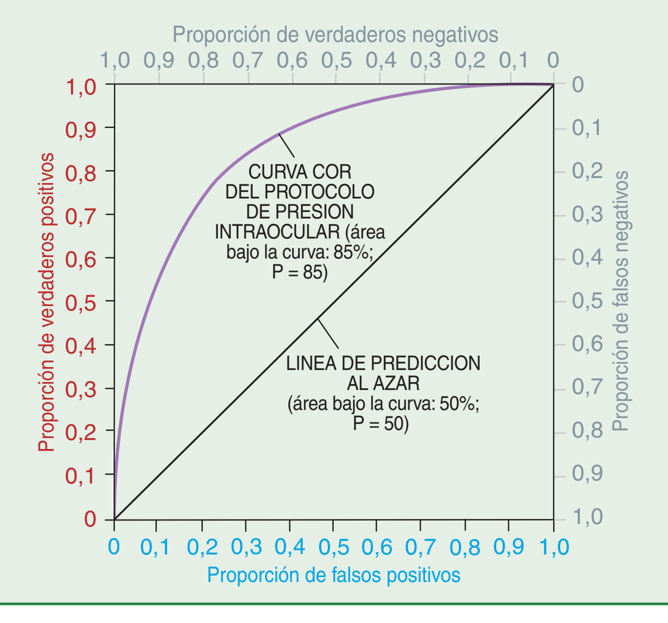
Mejor diagnóstico del cáncer

Los métodos estadísticos de predicción han tenido un éxito considerable en el diagnóstico del cáncer de mama. Los radiólogos de una serie de hospitales evaluaron las mamografías según su propio método subjetivo. Meses después, evaluaron esas misma mamografías mediante una lista de características perceptivas (difuminación de los límites de una masa, por ejemplo). Finalmente, una regla estadística de predicción transformó las puntuaciones en juicios de probabilidad sobre la presencia de cáncer de mama en cada paciente. Se informó a los radiólogos de estas probabilidades, pero fueron ellos en última instancia los que emitieron su juicio clínico. La información adicional les ayudó notablemente. Los radiólogos generales que tomaron los datos estadísticos en consideración, realizaron predicciones más exactas, alcanzando la precisión de los especialistas que habían utilizado la lista.

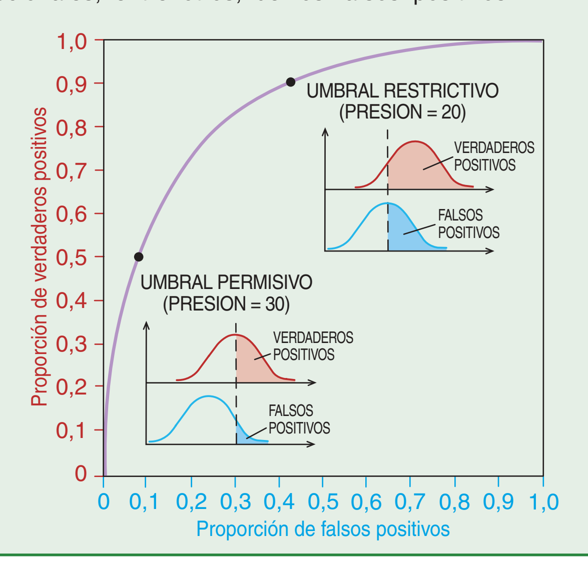
Los médicos que tratan el cáncer de próstata utilizan las reglas estadísticas de predicción. Uno de esos métodos da resultados excelentes. Una vez que se ha etiquetado clínicamente la afección de un paciente como cáncer de próstata (a partir de un examen físico, una biopsia mediante punción y otros métodos no agresivos), surge la cuestión de cuál es el mejor tratamiento. Ni la cirugía de la glándula ni la radioterapia conformacional (irradiación concentrada en la próstata) eliminarán el tumor, si en su crecimiento ha desbordado los límites de la glándula o si se ha diseminado a otras partes del cuerpo. Por ello, los médicos intentan determinar el estado del tumor antes de plantearse el tratamiento. Desafortunadamente, muchos tumores que inicialmente se consideran limitados a la próstata resultan más avanzados.

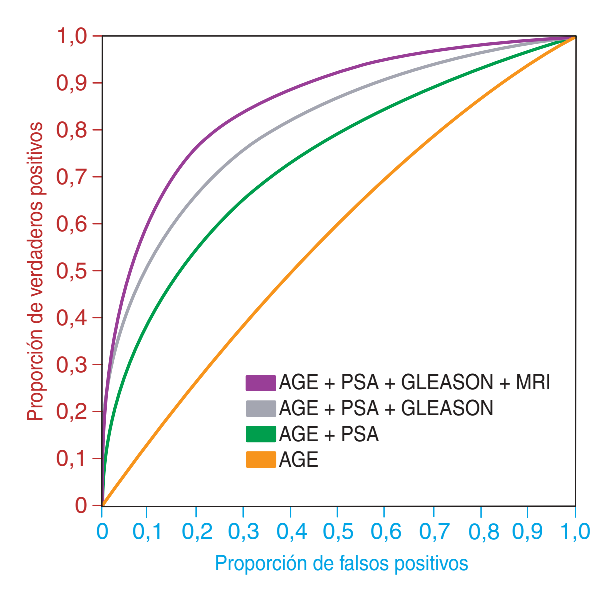
Durante años, los médicos dispusieron de pocos medios fiables para determinar qué tumores estaban confinados y cuáles no. Recientemente,

PASO 3: Constrúyase una curva COR en un eje de coordenadas que señale, para cada valor del umbral, la proporción de verdaderos positivos en función de la de falsos positivos. Si se obtiene una recta, la prueba diagnóstica tendrá una probabilidad del 50 por ciento de proporcionar un diagnóstico acertado (no mejor que lanzar una moneda al aire). A medida que las curvas se abomban hacia el eje de ordenadas, su precisión aumenta (una relación mayor de verdaderos positivos a falsos positivos). La precisión (P) se relaciona con el área bajo la curva, que aumenta a medida que la curva se abomba. Aquí, el protocolo de glaucoma es sólo moderadamente preciso.



PASO 4: Si la precisión es aceptable, selecciónese un umbral para el diagnóstico dicotómico (Sí/No). Escójase un umbral que proporcione una buena tasa de verdaderos positivos, sin que ello comporte una tasa de falsos positivos inaceptable. Cada punto de la curva representa un umbral determinado, siendo más restrictivo cuanto más próximo al origen, abajo a la izquierda, y más permisivo en el extremo opuesto, arriba a la derecha. Las cotas más restrictivas (*imagen inferior*) limitan el número de falsos positivos a costa de perder una gran cantidad de individuos afectos, mientras que los puntos de corte permisivos maximizan la identificación de los individuos afectados, aunque pagan por ello con muchos falsos positivos. El mejor umbral para una población determinada depende de factores como la gravedad de la enfermedad, su prevalencia en la población, la disponibilidad de tratamientos para los afectados y los costes económicos y emocionales, entre otros, de los falsos positivos.





2. LAS CURVAS COR compararon la precisión a la que se podía llegar mediante medición de una o más de las siguientes variables, para evaluar el estadio evolutivo de un cáncer de próstata: edad del paciente, nivel sanguíneo del antígeno prostático específico (PSA), agresividad tumoral (representada por la puntuación de Gleason) y la apariencia tumoral juzgada por resonancia magnética. El mejor resultó ser el esquema que incluía las cuatros variables (*curva superior*).

sin embargo, médicos y pacientes pueden tener una idea más clara de la situación mediante las tablas de probabilidad publicadas en el número del 14 de mayo de 1997 del *Journal of the American Medical Asociation*.

Los investigadores que confeccionaron las tablas conocían la capacidad predictora independiente de tres índices: el estadio clínico del tumor (determinación del tamaño del tumor y de su extensión basada en pruebas no invasivas), los niveles en sangre de la proteína PSA (antígeno prostático específico) y la puntuación de Gleason (indicador de la agresividad tumoral fundado en el análisis microscópico de muestras obtenidas por biopsia). Los investigadores desarrollaron un método estadístico de predicción que ofreciera un resultado para virtualmente cualquier combinación de valores de estas variables y calculara la probabilidad de que el diagnóstico inicial de "no extensión" fuera correcto. Las probabilidades obtenidas se presentan en forma tabulada, de fácil manejo.

Sería un error pensar que sólo los médicos utilizan reglas estadísticas de predicción. Hace más de veinticinco años que los meteorólogos vienen aplicándolas.

El servicio meteorológico nacional de los EE.UU. introduce de manera rutinaria datos atmosféricos en programas estadísticos diseñados para estimar la probabilidad de aparición, en cualquier punto del territorio, de tornados, huracanes, tormentas y demás inclemencias. El servicio meteorológico facilita estas predicciones objetivas a meteorólogos locales que modifican las predicciones a la luz de informaciones posteriores o de factores que consideren que el programa no ha tratado adecuadamente.

Otros grupos también han abrazado estas técnicas, entre ellos, los comités de admisión de algunas universidades estadounidenses, A modo de ejemplo, un comité predice las notas del primer año de carrera a partir de dos variables, las notas del bachillerato y las de los exámenes de aptitud, partiendo del supuesto de que los estudiantes con calificaciones superiores a un punto de corte prefijado deberían ser admitidos y, rechazados, los situados por debajo, para luego evaluar de forma subjetiva los expedientes de los no admitidos según esos parámetros.

Una facultad de derecho valora de forma objetiva dos variables que antes se estudiaban de forma subjetiva: la calidad de la institución académica de donde proviene el alumno y la inflación de las notas del centro. Además del promedio de la puntuación de secundaria y la nota del examen de aptitud del propio alumno, el algoritmo de cálculo utiliza también los valores medios de esas mismas variables obtenidos por los alumnos del mismo instituto de secundaria. Esta fórmula revisada predice significativamente mejor las notas del primer año que el método basado en sólo dos variables.

JOHN A. SWETS, ROBYN M. DAWES y JOHN MONAHAN han ahondado conjuntamente en el tema abordado en el artículo. Los tres comparten docencia e investigación. Swets enseña en la Universidad de Harvard, Dawes en Carnegie Mellon y Monahan en la de Virginia.

Umbrales espinosos

Hasta ahora hemos puesto ejemplos exitosos. Pero las ventajas de los análisis estadísticos se pueden ilustrar mejor mostrando a dónde conduce el no utilizar umbrales diagnósticos racionales, como es el caso de las pruebas que detectan el virus de la inmunodeficiencia (VIH), el agente del sida.

La prueba de cribaje del VIH comienza con un test sencillo, que detecta la presencia de anticuerpos anti-VIH, moléculas que el sistema inmunitario fabrica en presencia del virus, aunque pueden también aparecer por otras causas. Por este motivo, si la prueba resulta positiva (basada en una determinada concentración mínima del antígeno), el laboratorio aplicará otra prueba más compleja de confirmación. Este método de doble prueba tiene por objetivo reducir el número de falsos positivos. Las pruebas de anticuerpos son particularmente problemáticas, porque, fuera de toda lógica, las distintas pruebas aceptadas difieren en su precisión y en el umbral de detección. La elección de puntos de corte diferentes tendría sentido si las pruebas fueran concebidas para poblaciones distintas, pero no es el caso.

Los puntos de corte resultan enojosos desde otro enfoque. Originalmente se fijaron para diferenciar las donaciones de sangre limpia de las aportaciones contaminadas, y se mantuvieron igual cuando se utilizaron para identificar personas infectadas por el virus. Desperdiciar una bolsa de sangre limpia por un resultado falso positivo es un error menor. Pero alarmar a una persona no infectada y someterla a más pruebas no lo es tanto. Más aún, los mismos puntos de corte originales se han aplicado a todos los donantes de sangre: poblaciones de riesgo bajo, riesgo alto, reclutas y personas que siguen tratamiento con metadona (grupos entre los que la prevalencia de la infección varía de forma muy importante). En los grupos de alto riesgo, el punto de corte debería ser muy bajo para maximizar la detección, aun a costa de un mayor número de falsos positivos.

En los últimos años han aparecido pruebas de confirmación más precisas y tratamientos anti-VIH que prolongan la vida y la salud de los pacientes. En consecuencia, los resultados falsos positivos son raros hoy en día y las personas diagnosticadas de infección por VIH se benefician mu-

UNA CUESTION DE GUSTO

Los arquitectos y los enólogos han desarrollado dos de las aplicaciones más insólitas de los métodos estadísticos de predicción. En arquitectura se han aplicado a la construcción de teatros de ópera. Se desarrollaron a partir de las valoraciones de directores de orquesta de 23 salas, que fueron especialmente favorables a las de Buenos Aires, Dresde, Milán y Tokio. Luego, los ingenieros de acústica midieron determinadas propiedades acústicas de los 23 teatros, tales como el retraso en la llegada del sonido directo y el reflejado y la difusión de las ondas producida por las irregularidades del techo y las paredes. Los análisis estadísticos revelaron después las características que daban a las salas de ópera mejor valoradas su sonido excepcional. Sobre esos datos, ha progresado el proyecto de nuevas salas.



EL TEATRO DE LA OPERA de Tokio goza de una acústica envidiable, que puede servir de modelo a imitar mediante un método estadístico de predicción.

Para el vino también se dispone de un método estadístico que predice la calidad de los caldos tintos de Burdeos (valorada a partir de sus precios de subasta) cuando aún son jóvenes y no aptos para el consumo. Los expertos solían predecir la calidad futura del vino oliendo y degustando el nuevo producto. Pero hace cosa de un decenio, los investigadores observaron que los años con meses de agosto y septiembre secos y una estación de crecimiento calurosa seguidos de un invierno húmedo proporcionaban excelentes vinos.

Se formuló entonces la "ecuación de Burdeos", un método estadístico de predicción que combina las condiciones climáticas y los años de envejecimiento para predecir una gran calidad del vino en los años siguientes. La ecuación explica el 83 por ciento de la variabilidad de los precios del vino tinto de Burdeos en subasta. *—J.A.S., R.M.D. y J.M.*

cho más del diagnóstico. Estos avances suponen que el problema ya no sea a quién considerar seropositivo, si no a quién aplicar la prueba.

Es hora de que los médicos reduzcan el umbral de necesidad de someterse a una prueba. No deberían esperar a que los pacientes tengan síntomas característicos de la infección. Estamos a favor de que se aplique el cribaje a todos los adultos jóvenes y de que las administraciones sanitarias encabecen tal iniciativa.

La industria aerospacial no presta atención suficiente a los métodos objetivos de establecimiento de umbrales válidos. En las rutinas de mantenimiento deben descubrirse problemas serios, aunque infrecuentes, como microfisuras en las alas y situaciones de emergencia durante el vuelo. Si no se diagnostica una fisura en el ala las consecuencias pueden ser catastróficas. Por otra parte, una decisión del tipo falso positivo (considerar fisurada un ala que no lo está) deja fuera de servicio la nave con las consiguientes pérdidas económicas. A primera vista, parecería que se debería optar por un umbral muy sensible, para primar las vidas por encima del dinero. Sin embargo, tales situaciones son infrecuentes, por lo que un umbral excesivamente sensible proporcionaría un número de falsos positivos abrumador. Nadie ha reparado hasta ahora en la posibilidad de estudiar el fenómeno con herramientas estadísticas.

Tampoco las líneas aéreas ni el ejército han sabido manejar los umbrales diagnósticos en la adquisición de alarmas de cabina. Las alarmas saltan en pleno vuelo en muchas circunstancias: cuando un avión se aproxima en exceso a otro o vuela demasiado bajo, cuando se para un motor, cuando un exceso de viento puede suponer un problema en la zona de aterrizaje. Lo malo es que avisan con demasiada frecuencia de la llegada del lobo, en gran medida porque su precisión es moderada y, muy sensible, el umbral de detección. Ante esa cascada de avisos, que obligan a numerosas interrupciones, los pilotos suelen mostrarse muy remisos. Se corre, pues, el riesgo de que los pilotos ignoren o reaccionen demasiado tarde ante una emergencia real. Hasta la fecha, nadie ha obligado a los fabricantes a considerar la tasa de falsos positivos a la hora de fijar los umbrales de detección.

Una petición

Los métodos estadísticos de predicción aumentan a menudo la precisión de decisiones diagnósticas repetitivas; las fórmulas para establecer umbrales de partida mejoran la utilidad de dichas opciones. No acaban ahí las ventajas ofrecidas por estas herramientas: al normalizar los análisis sobre los que se fundan los diagnósticos, los métodos estadísticos facilitan la identificación de parámetros importantes. Proporcionan a los que han de tomar la decisión argumentos fáciles de comunicar y hacerlo de una manera más precisa sobre impresiones vagas.

Pese a ello, se reciben a menudo con reticencia, especialmente cuando se considera que suplen o minusvaloran a los clínicos. Los médicos no quieren perder, además, el dominio sobre sus propios diagnósticos y recomendaciones; antes bien, desean recalcar que son capaces de dar cuenta en forma narrativa de sus procesos mentales. Cuesta a veces integrar los resultados de un método estadístico de predicción en ese tipo de explicaciones, en particular si la lógica subyacente bajo el análisis no es evidente.

Comprendemos todas estas preocupaciones. Sin embargo, los beneficios proporcionados por las herramientas estadísticas justifican su consideración por quienes tengan la vida y el futuro de otros en sus manos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THINK HIV: WHY PHYSICIANS SHOULD LOWER THEIR THRESHOLD FOR HIV TESTING. Kenneth A. Freedberg y Jeffrey H. Samet en *Archives of Internal Medicine*, vol. 159, n.º 17, págs.1994-2003; 27 de septiembre de 1999.

PSYCHOLOGICAL SCIENCE CAN IMPROVE DIAGNOSTIC DECISIONS. John A. Swets, Robyn M. Dawes y John Monahan en *Psychological Science in the Public Interest* (suplemento de *Psychological Science*), vol. 1, n.º 1, págs. 1-26; mayo de 2000.

Corredor de homínidos en Africa sudoriental

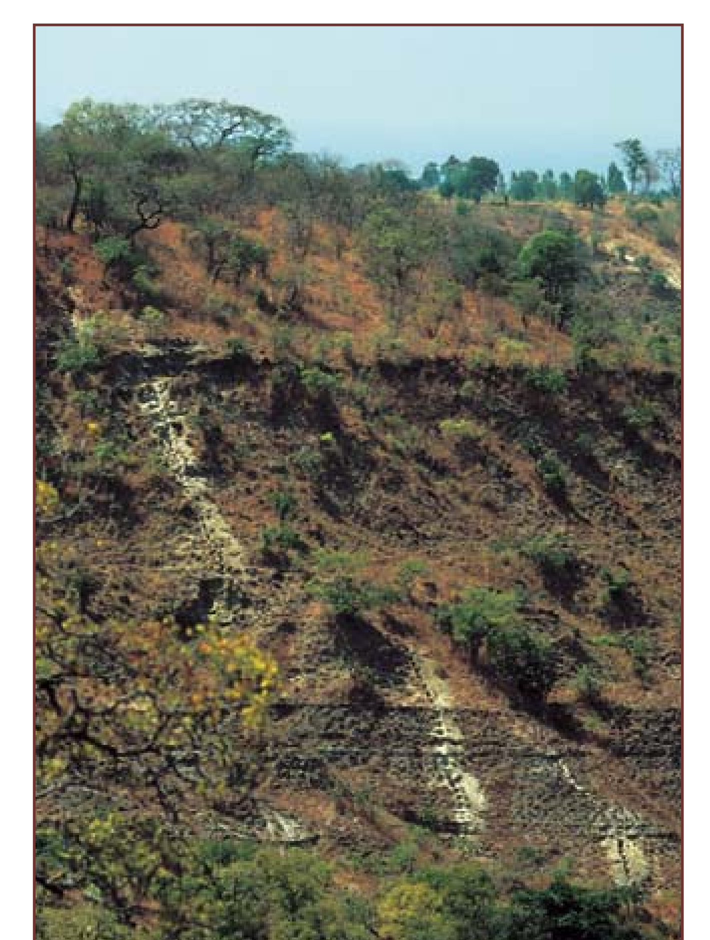
Entre dos importantes yacimientos muy distantes entre sí se abre una ventana que permite reconocer la ruta seguida por los homínidos africanos y arroja luz sobre su movilidad

Friedemann Schrenk y Timothy G. Bromage

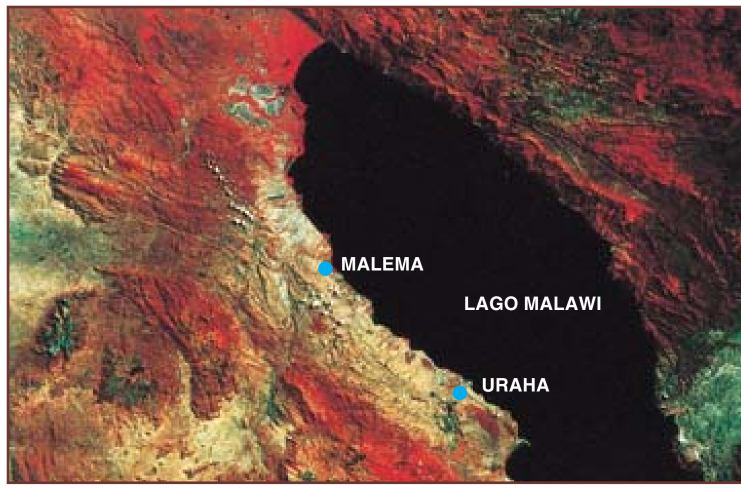
En Africa se encuentra la cuna de nuestros antepasados prehumanos y protohumanos. Con repetida frecuencia, los hallazgos señalan el este del continente africano como zona catalizadora del desarrollo de la humanidad. Allí surgió la marcha erguida y allí, por vez primera, el cerebro empezó a ganar peso, en sentido literal y figurado. Los paleoantropólogos se muestran unánimes en el reconocimiento de ambos factores. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de fósiles encontrados, o tal vez precisamente por ello, siguen habiendo notables discrepancias en torno a ciertos aspectos del proceso evolutivo.

A principios de los años ochenta, el mapa de Africa sólo presentaba dos grandes áreas de yacimientos con restos de homínidos, una en el sur y otra en el este. Entre una y otra había un vacío sin indicios de ningún corredor que uniera los varios miles de kilómetros que separan el norte del Transvaal (Sudáfrica) y la garganta tanzana de Olduwai. El fenómeno llamó nuestra atención. Nos propusimos, en esas fechas, buscar fósiles de homínidos en el trayecto intermedio, explorando una región más extensa de lo habitual. Sorteamos injerencias políticas y de otro orden que, por aquellas fechas, obstaculizaban la investigación en la evolución de los homínidos. Partíamos de la base de que el proceso de hominización fue un fenómeno general panafricano, que sólo recibiría cabal explicación cuando se llenaran los huecos geográficos entre los diversos yacimientos.

Más aún. Ningún ser vivo se desarrolla independientemente del medio donde medra. Los cambios del clima, del entorno y del espacio vital conforman el marco donde se produce la evolución. Por consiguiente, había que reconstruir las cambiantes condiciones ecológicas en que se desarrollaron y, sobre todo, se expandieron los primeros homínidos. Los cambios que estas condiciones ambientales provocaron en la fauna del sudeste africano nos proporcionan una valiosa información. Con este amplio planteamiento, poco habitual en aquel entonces, abordamos el estudio de la ecología evolutiva de la especie humana y de su proceso de expansión. Creemos que sólo así se pueden plantear hipótesis sólidas sobre las rela-



1. ZONA DE EXPLORACION en el Rift de Malawi, sector meridional del sistema de fosas africanas. En la orilla noroeste del lago Malawi aparecen los estratos sedimentarios en estudio; forman una franja de unos 10 kilómetros (*coloración clara en la foto inferior, tomada desde un satélite*). Los estratos correspondientes a una fase de la hominización —hace de cinco a menos de dos millones de años— se encuentran en los lechos de Chiwondo, con sus característicos valles erosivos estrechos y profundos.





2. EL PROTOHUMANO *homo rudolfensis*. La mandíbula inferior aquí representada, con sus 2,5 millones de años de antigüedad, constituye el resto más antiguo del género *Homo*. Fue descubierta por el equipo del proyecto de investigación “Corredor de homínidos” en la costa nordoccidental del lago Malawi, cerca de Uraha.

ciones entre los distintos tipos de fósiles humanos, pues no bastan las escuetas características anatómicas.

Teníamos que empezar por desbrozar los estratos sedimentarios de la época correspondiente: desde principios del Plioceno, hace cinco millones de años, hasta el Pleistoceno, la época geológica de las glaciaciones que comenzó hace unos dos millones de años. Basándonos en fotografías obtenidas desde satélites y en informes geológicos de la época colonial, localizamos una zona apropiada en la costa occidental del lago Malawi. Este lago forma parte del gran sistema de fosas africanas (‘Rift’) que marca la deriva de las placas continentales. Se hicieron sucesivas excavaciones en las laderas de la fosa. Los sedimentos sepultan los restos animales no corruptibles, como huesos y dientes, evitando su descomposición total. Hundidos profundamente en el curso de los últimos cinco millones de años, los estratos más antiguos volvieron a elevarse hace unos 500.000 años, cuando se produjo un estrechamiento local en el norte del valle de Malawi. Aquellos sedimentos son hoy accesibles desde la superficie.

FRIEDEMANN SCHRENK y TIMOTHY G. BROMAGE dirigen el proyecto de investigación Corredor de homínidos en Malawi. Schrenk trabaja en el Museo estatal de Hese en Darmstadt y enseña paleontología de vertebrados en la Universidad de Frankfurt, donde se doctoró en 1986. Bromage, profesor en el Colegio Hunter de Nueva York, se doctoró en la Universidad de Toronto.

En nuestra opinión este sistema de fosas corresponde a una antigua corriente de agua que unía el sur y el este de Africa. En todo caso, el trayecto representa la ruta más corta entre dos distantes zonas de yacimientos. Como nuestro principal objetivo era la reconstrucción de los cambios experimentados en el espacio vital y en el mundo animal, así como la identificación de posibles rutas de expansión, no teníamos ninguna alternativa a la fosa de Malawi pese a su escasez de fósiles. Así nació nuestro “proyecto Corredor de Homínidos”.

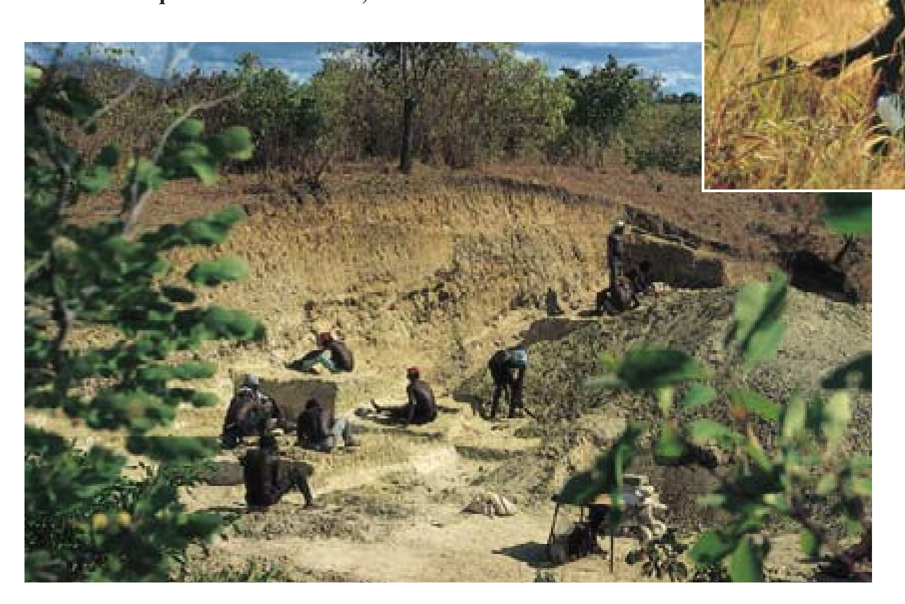
Con Yusuf Juwayeyi, del departamento de arqueología de Lilongwe, y otros colegas de Malawi empezamos en 1984 a estudiar sistemáticamente las frágiles tierras de la costa nordoccidental del lago. Los estratos sedimentarios alcanzan allí una longitud de 80 y una anchura de 10 kilómetros. Las capas plio-pleistocenas se conocen desde los años veinte como ‘lechos de Chiwondo’.

Al cabo de unos 16 años de trabajo, el catálogo de nuestros hallazgos incluía apenas unos 1500 fósiles de vertebrados. Por cada kilómetro cuadrado solíamos encontrar sólo un fragmento, un bajísimo índice de hallazgos. Unicamente en lugares muy concretos dábamos con un depósito masivo de fósiles. La recogida de información resultaba muy laboriosa. Grupos de veinte a treinta colaboradores exploraban repetidas veces cada centímetro cuadrado y recogían los restos fósiles que encontraban. Allí donde se preveía más rentabilidad se hacía una excavación dirigida. La lluvia se convirtió en aliado. Las aguas se llevaban una y otra vez los sedimentos menos compactos, de modo que lentamente afluían a la superficie nuevos fragmentos. La despoblación, casi absoluta, de la zona permitía que dejáramos los hallazgos al aire libre expuestos a la erosión natural.

Un dato importante de nuestra investigación era la exploración sedimentológica de todos los hallazgos, localizados con toda exactitud mediante el GPS (Sistema Global de Situación). Más tarde, esto nos permitiría juntar fragmentos extraídos con años de diferencia.

Entre los fósiles de vertebrados, los peces, tortugas y cocodrilos suponen alrededor de una cuarta parte, mientras que los mamíferos representan la gran mayoría restante. De estos mamíferos fosilizados los antílopes suponen aproximadamente la mitad, seguidos por orden numérico de équidos, suidos, hipopótamos, jirafas, elefantes y primates. Tal distribución refleja la misma proporción natural de especies que se observa hoy en día en los parques africanos. Se echan en falta pequeños mamí-

3. MEDIANTE EXPLORACIONES DE SUPERFICIE se hace un reconocimiento paleontológico de los estratos con posible contenido de fósiles. En áreas previamente definidas con toda exactitud, el equipo busca restos fósiles (*centro*). Ante la presencia de cualquier fósil de vertebrado, éste queda localizado con toda precisión mediante el GPS y registrado en el catálogo de hallazgos. Sólo allí donde cabe esperar se escondan hallazgos importantes el equipo emprende excavaciones sistemáticas; a la izquierda en Malema, a la derecha en Uraha.





feros y grandes carnívoros. En el caso de los primeros, quizá la débil consistencia de huesos y dientes les impidiera perdurar. Por lo que concierne a los carnívoros, escaseaban por entonces, como corroboran otros yacimientos.

Los antílopes son unos buenos indicadores ecológicos. No se olvide que, de muchas de sus especies fósiles, existen hoy descendientes. Observando qué especies actuales prefieren determinados espacios vitales podemos inferir en qué medio una especie fósil se encontraba 'en su ambiente', si en una sabana arbórea abierta, en un matorral o en bosques de ribera.

En los trabajos de datación los fósiles de suidos desempeñan un papel principal. De manera particular, el tercer molar del jabalí de los arbustos y del jabalí gigante ha sufrido claras modificaciones en los últimos cuatro millones de años; ancho y de poca altura en un comienzo, se torna alto, estrecho y con una elevada corona. Semejante transición convierte a estas piezas dentarias en fósiles-clave, que, basándonos en cronologías conocidas de otras regiones, nos permiten hacer una ordenación temporal.

Los lechos de Chiwondo contienen, además, ingentes cantidades de fósiles de conchas de caracoles, que el lago Malawi ha ido limpiando en sus antiguas playas. En opinión de Christian Betzler y de Uwe Ring, aquél sedimentólogo de nuestro proyecto y docente en la Universidad de Frankfurt y éste especialista en tectónica que profesa en la Universidad de Maguncia, los fósiles en cuestión datan de hace aproximadamente cuatro millones de años.

Los fósiles de vertebrados pueden ordenarse cronológicamente en tres etapas: la más antigua con una edad superior a los cuatro millones de años, la más reciente con una edad inferior a los 1,6 millones de años, y una intermedia que, separada por algunos estratos vacíos, se extiende entre los 3,8 y los dos millones de años. En los estratos más recientes aumenta la proporción de animales que vivían en la sabana abierta. Se advierte que, hace unos 2,5 millones de años, ocurrieron notables cambios climáticos en Africa, relacionados con el comienzo de las glaciaciones en el hemisferio norte.

Prehumanos y protohumanos

Australopitecinos gráciles
Estos prehumanos, probablemente de una antigüedad de cinco millones de años, andaban sobre dos piernas y podían trepar por los árboles. Su cerebro no era mucho mayor que el de los simios antropoides. No habían adquirido todavía una cultura instrumental; para la preparación de sus alimentos disponían sólo de sus molares.

Género *Paranthropus*
Los llamados australopitecinos robustos desarrollaron unos dientes poderosos. Su primer representante coexistió con los primeros protohumanos. Masticaban alimentos vegetales duros.

Género *Homo*
Los protohumanos, que se remontan 2,5 millones de años atrás, sólo deambulaban. El tamaño del cerebro de este género, el nuestro, aumentó considerablemente. Gracias a su cultura instrumental los molares perdieron importancia para el desmenuzamiento de los alimentos.

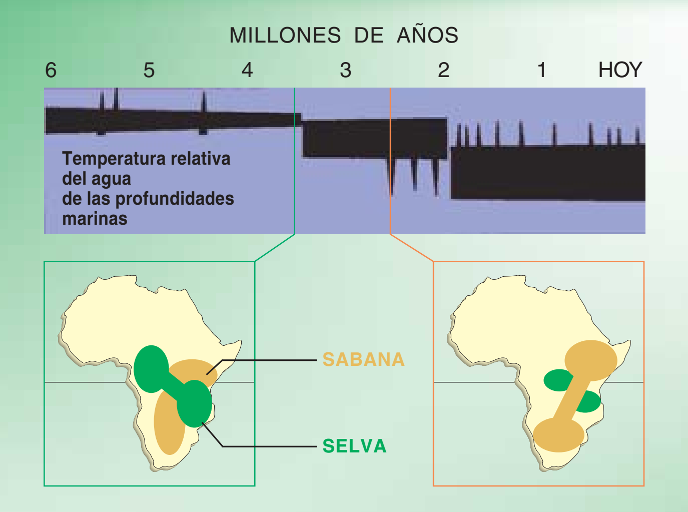
La multiplicidad ecológica del mundo animal en el corredor de los homínidos permite también una clara diferenciación de los espacios vitales; los había de fácil acceso al agua, territorios secos y cerrados de arbustos, así como sabanas arbóreas abiertas. El estudio de los sedimentos nos remite también a ríos con abundantes meandros, lagunas y deltas.

El corredor se incluye hoy en la ecozona del Zambeze. Situada en el Africa sudoriental, forma una cuña entre la zona tropical y la templada del continente. Para esclarecer las relaciones biogeográficas de la ecozona nos aprestamos a ordenar los hallazgos más recientes de grandes mamíferos según su área de origen. De ello resultó que 14 especies procedían del Africa oriental y meridional, tres revelaban un origen sudafricano y 17 especies provenían exclusivamente del Africa oriental. El grupo más numeroso lo constituía la fauna del "corredor del Rift", típica de las zonas altas y bajas del este africano. De esas observaciones se infiere que el paso de marras se integraba en una serie consecutiva de espacios vitales (hábitats) relacionados entre sí, hasta crear una franja que se extiende del Africa nororiental al Africa sudoriental.

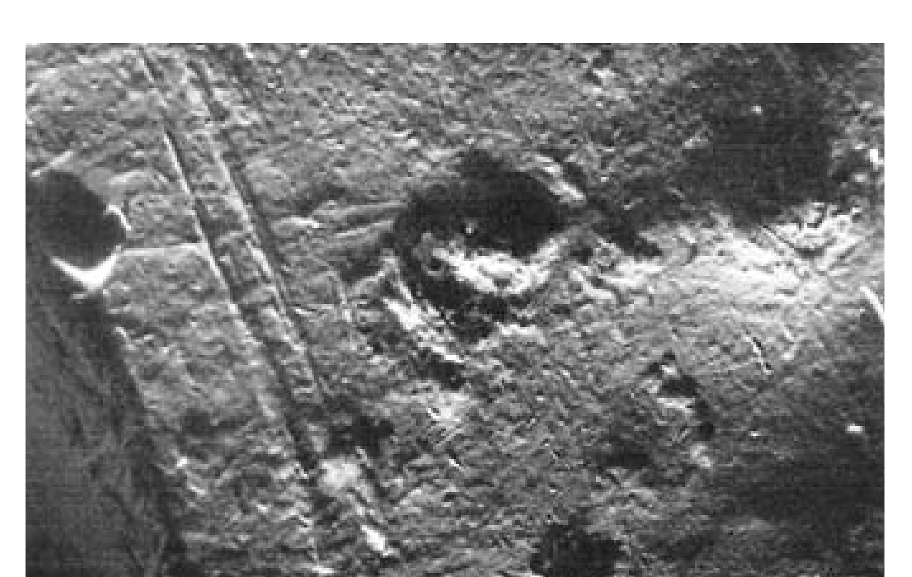
La ecozona del Zambeze conjugaba su carácter autónomo con ciertos intercambios con las zonas meridional y oriental de Africa. Los animales vinculados a un hábitat específico podrían abandonarlo, hacia el norte o hacia el sur, en cuanto se dieran condiciones favorables. Así ocurrió hace unos 2,3 millones de años cuando, coincidiendo con una progresiva glaciación de las regiones árticas, el clima en Africa se fue haciendo más frío y, sobre todo, más seco; prados y bosques subtropicales se retiraron hacia el ecuador. Nuestros escasos fósiles de los grandes mamíferos que habitaban el Africa meridional atestiguan que entonces, igual que hoy, territorios húmedos y secos de gramíneas unían el Africa meridional con la ecozona del Zambeze.

Después de cinco años de trabajo de campo ratificábamos la expansión meridional que protagonizaron los camellos en Africa y demostrábamos la existencia de un corredor seguido por suidos y antílopes. Respecto a nuestro "corredor de homínidos", los resultados que esperábamos sobre la ecología evolutiva de los homínidos iban a depender del descubrimiento





Hace alrededor de cuatro millones de años, entre las sabanas del sur y del este de Africa se extendía una zona boscosa que separaba la fauna de una y otra. Un millón y medio de años después, el clima global de Africa se enfrió y se hizo más seco. Los animales de sabana se propagaron a lo largo de un eje norte-sur; los hábitats se retiraron hacia el ecuador. La región del Malawi formaba entonces parte de un corredor fluvial que facilitaba el desplazamiento de animales y humanos. Los fósiles encontrados atestiguan los cambios climáticos y ecológicos.





4. EN UNA EXCAVACION acometida cerca de Malema, apareció en 1996 un fragmento de mandíbula superior con molares de un tamaño triple que el del hombre actual. Pertenecía a la especie *Paranthropus boisei*, del grupo de los australopitecinos robustos. Representa la demostración más antigua de su coexistencia con el género *Homo*. Hoyos y estrías del esmalte dentario demuestran que el homínido tuvo que masticar alimentos vegetales duros.

de restos fósiles. En el extremo sur del área de exploración, cerca de Uraha, nuestro equipo halló en 1991 la mandíbula inferior de un homínido en los estratos correspondientes a 2,5 millones de años de antigüedad. Se le asignó el número de catálogo UR 501. Aunque se trataba de nuestro hallazgo número 499, se le otorgó ese guarismo en alusión al ‘Levis Jeans 501’ (“El Original”). La mandíbula contenía casi todas las piezas dentarias, incisivos incluidos; presentaba mayor deterioro en la parte izquierda que en la derecha. Por tomografía computarizada se dedujo la forma y estructura de las raíces dentales, dato importante para la ordenación sistemática. La microestructura del esmalte dental era similar a la de los australopitecos prehumanos. Sin embargo, otros rasgos denunciaban cierto parentesco con el género *Homo*.

Un año más tarde, fruto de un minucioso trabajo, encontramos la cuarta parte que faltaba del segundo molar derecho: se transportaron toneladas de arena del yacimiento hasta las orillas del lago Malawi, para lavarlas y cernerlas a través de cedazos cada vez más finos; al cabo de varias semanas, apareció el fragmento desprendido. En la pieza dentaria, ahora completa, pudieron analizarse todas las rugosidades, lo que facilitó la identificación de la pieza: pertenecía a la especie *Homo rudolfensis*. No sólo eso. Se trataba de la muestra más antigua del género *Homo*.

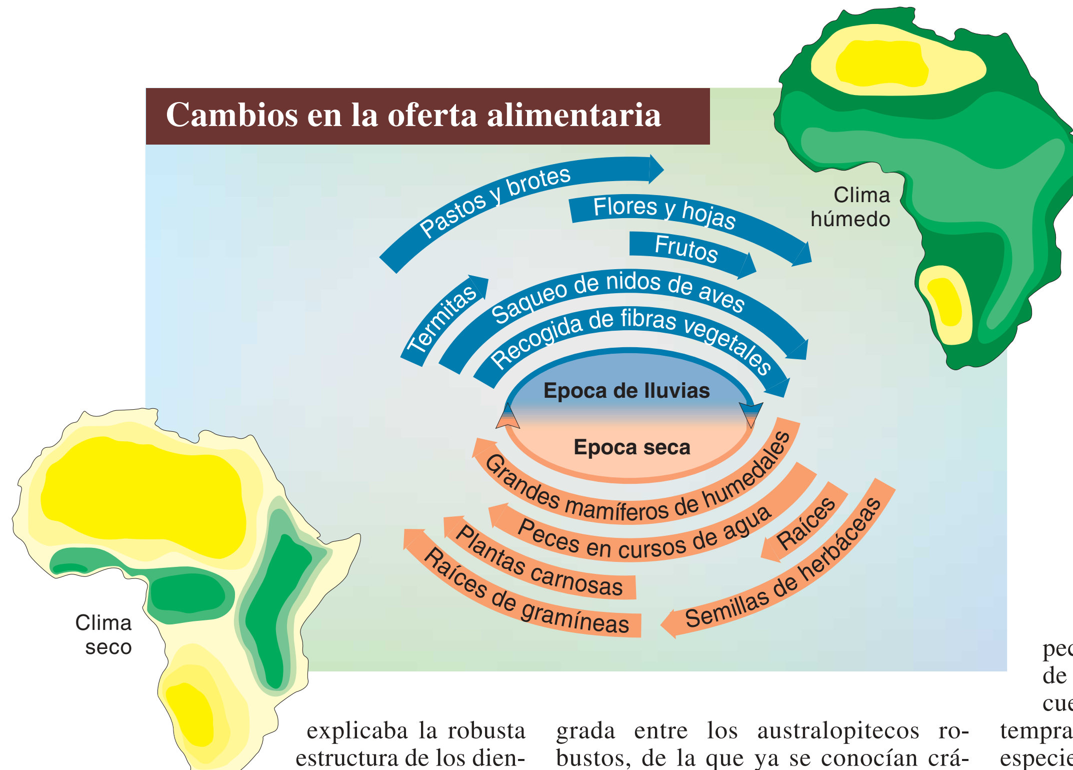
Hasta aquel momento se aceptaba que otra especie, *Homo habilis*, constituía la representante más arcaica de los protohumanos. El origen del género *Homo* ha sido, y sigue siendo, una de las cuestiones más enconadamente debatidas de la paleoantropología. Ante la enorme variabilidad del abundante material que se adscribía a la especie *Homo sapiens*, encontrado hasta principios de los años noventa, Bernard Wood, de la Universidad de Liverpool, propuso, tras clasificarlo, que parte del mismo se incluyera en una especie distinta. Algunas diferencias, aduce, sobrepasan las variaciones típicas en las características reconocidas como específicas del género y afectan de raíz al plan estructural. En consecuencia, habría que separar estos restos en dos grupos.

Ya en 1986 había expresado un planteamiento idéntico el paleontólogo ruso V. P. Alexeev. Se fundaba en un cráneo encontrado en el mismo yacimiento y que atribuyó a una especie a la que denominó *Pithecanthropus (Homo) rudolfensis*. El nombre evocaba la situación del yacimiento, junto al lago Rodolfo, el actual Turkana, al norte de Kenia. El cráneo cuadra perfectamente en la propuesta de una nueva especie de Wood que, por respeto al primer nombre recibido, se conoce como *Homo rudolfensis*. Según todos los análisis, “nuestra” mandíbula pertenece con mucha probabilidad a esta nueva especie; de ahí su catalogación técnica de “Hombre del lago Rodolfo”, pese a proceder de las orillas del lago Malawi. Con este hallazgo se resolvió también el problema de la edad, pues en el norte de Kenia los fragmentos de las dos especies proceden aproximadamente de la misma época, hace unos dos millones de años. Con la datación de la mandíbula de Malawi en medio millón de años antes, *Homo rudolfensis* adquiere el rango de homínido más antiguo.

Esta especie, con su típica mezcla de caracteres de prehumanos y de *Homo*, tenía una constitución muy robusta; lo demuestran su cráneo, su aparato masticatorio y sus piezas dentales. Coincidiendo con un clima que iba haciéndose progresivamente más seco, la flora y los alimentos vegetales resultaban cada vez más duros de masticar. Era evidente que la alimentación de *Homo rudolfensis* seguía siendo predominantemente vegetariana. A primera vista, ésa parecía la razón funcional más sencilla que

5. EN LA REGION DE MALEMA, donde apareció *Paranthropus boisei*, predominaba entonces una fauna de mamíferos típica de la sabana seca abierta. A unos 50 kilómetros al sur, cerca de Uraha, se halló el resto fósil de *Homo rudolfensis*; hubo allí mamíferos que podían medrar en un hábitat cerrado. En uno y otro lugar, sin embargo, la fauna es una mezcla de especies típicas del sur y del este de Africa con predominio de la del Africa oriental. Los sectores representados se refieren a grupos completos de animales.

Cambios en la oferta alimentaria



6. SEGUN LAS EPOCAS fueran secas o lluviosas variaba la oferta alimentaria de los prehumanos y de los protohumanos. En épocas secas resultantes del cambio de clima (*a la izquierda, abajo*) prosperaron las plantas más resistentes. Los alimentos eran más duros. Los australopitecinos robustos desarrollaron el aparato masticatorio hasta límites extremos, mientras que *Homo rudolfensis* utilizaba ya instrumentos.

explicaba la robusta estructura de los dientes del protohumano. Sin embargo, un hallazgo posterior en la región del Malawi nos deparaba una sorpresa.

Ya en 1985 habíamos descubierto un lugar situado a 50 kilómetros al norte de Uraha, junto a Malema, que encerraba una cantidad notable de fósiles de mamíferos, entre ellos primates no humanos. Pero no nos decidimos a investigarlo hasta que encontramos un cráneo de elefante. Pasado un largo decenio, en la temporada de 1996, coincidiendo con unas semanas de magros resultados, nuestros paleontólogos de mamíferos Oliver Sandrock y Ottmar Kullmer volvieron a estudiar el yacimiento. Encontraron un riquísimo osario. Junto a los restos animales apareció un fragmento de mandíbula superior con dos piezas dentarias perteneciente a un homínido. La edad del estrato donde se produjo el hallazgo coincidía con la de Uraha, pero los dientes eran mayores y más robustos que los del *Homo rudolfensis*, ¡casi el triple del hombre actual! Observada con el microscopio electrónico de barrido la superficie de las coronas dentales aparecía llena de hoyos y surcos, originados quizá por partículas de cuarzo que habrían llegado a la boca junto a los alimentos, predominantemente vegetales.

La dentadura-cascanueces. Herramientas simples

La "dentadura-cascanueces" resultó ser el resto más antiguo de *Paranthropus boisei*, una especie integrada entre los australopitecos robustos, de la que ya se conocían cráneos algo más recientes procedentes de otro yacimiento africano. Presenta esa especie un rostro ancho, con arcos zigomáticos de notable potencia, muy separados. En la parte superior del cráneo, allí donde se insertan los potentes músculos masticatorios de ambos lados, existe una cresta ósea curiosa. Todos estos datos, sumados a las gigantescas piezas dentarias, revelan que los "hombres-cascanueces" se nutrieran sobre todo de semillas y plantas fibrosas, alimentos vegetales duros y ásperos. Probablemente adquirieron esa robustez de forma bastante rápida, cuando Africa se fue haciendo cada vez más seca coincidiendo con un enfriamiento general de la Tierra, ocurrido hace unos dos millones y medio de años.

Del conjunto de nuestros hallazgos ecológicos se deduce que los hábitats abiertos, con una elevada proporción de vegetación resistente, fueron ganando terreno a los menguantes bosques de ribera. Los australopitecos robustos siguieron vinculados a las fértiles zonas húmedas, sobre todo durante las épocas de sequía. Sin embargo, debían de estar capacitados para aprovechar también los duros alimentos de que disponían en abundancia durante las épocas más favorables. Quizá nunca dejaron de tener acceso a la frondosa vegetación de su hábitat original, que les seguía ofreciendo protección y refugio para dormir.

Junto a estos australopitecos robustos, en el Rift de Malawi vivieron, hace unos 2,5 millones de años, los protohumanos más antiguos de la especie *Homo rudolfensis*. En la zona de nuestras exploraciones se encuentra la prueba geológica más temprana de coexistencia de las dos especies. Si los australopitecos robustos y los primeros representantes del género *Homo* proceden de antecesores australopitecinos más gráciles, es lógico pensar que debió darse una adecuada alternativa al desarrollo de dientes enormes para hacer frente a una alimentación cada vez más dura. Tal opción alternativa fue, por supuesto, la introducción de útiles. Las herramientas líticas más antiguas, procedentes de Etiopía y Tanzania, demuestran que, hace unos 2,5 millones de años, se establecieron las primeras culturas instrumentales; en esa misma época surgió el *Homo rudolfensis*.

Algunos animales, sobre todo los primates superiores, se sirven de instrumentos, entendiendo por tales ciertos útiles auxiliares. Los chimpancés, sin ir más lejos, emplean piedras como martillos y yunques para cascar nueces. Bajo la presión de los cambios ambientales que se dieron en aquella época, es lógico pensar en la aparición de una conducta cultural en los homínidos que posibilitó el advenimiento del género *Homo*. A diferencia de los australopitecinos robustos, los representantes del género *Homo* conservaron una estructura corporal menos rígida e hicieron frente al inconveniente del nuevo tipo de alimentación mediante una incipiente especialización cultural: trasladaron una parte de la preparación del alimento fuera de la cavidad bucal.

Después de la instauración de la marcha erecta (punto de partida del género *Australopithecus*), el hito siguiente en el camino hacia la hominización se dio con la superación de

la dependencia directa del entorno. A pesar de que en ese momento no se puede todavía demostrar lo "típicamente humano" —como conciencia, arte o música—, sí cabe postular que la aparición del género *Homo* emerge con el logro de una progresiva independencia del hábitat, lo cual lleva a una progresiva dependencia de los instrumentos utilizados para ello. Un rasgo que perdura típico de los humanos.

El *Homo rudolfensis* se caracteriza, sobre todo, por una conducta flexible, que se prolongará, en el siguiente estadio evolutivo, con el desarrollo de un cerebro mayor y capaz. Puede entonces modificar su alimentación, incluyendo en ella cada vez más carne. Con el comienzo de la cultura instrumental superó las consecuencias del cambio climático y aprovechó, mejor que ningún homínido anterior, otras fuentes alimentarias, entre ellas los cadáveres. En el uso de útiles líticos algunos se rompían, fragmentos que, debidamente afilados, podían emplearse como instrumento cortante. Este hecho revolucionó la preparación de la carne porque permitía descuartizar las piezas. A vegetarianos especializados como los australopitecinos robustos, la introducción de útiles líticos no les reportó ninguna ventaja inmediata. Mientras las dos estrategias alimentarias tuvieron éxito, vale decir, a lo largo de más de un millón de años, coexistieron diversos géneros y especies de homínidos. Los australopitecinos robustos se extinguieron hace alrededor de un millón de años, en una época en la que con *Homo erectus,* los sucesores de *Homo rudolfensis,* poblaban ya todo el viejo mundo.

El cambio climático, motor del desarrollo

No todos los paleoantropólogos están de acuerdo con nuestra interpretación del *Homo rudolfensis*. En 1999 se describió una nueva especie de prehumano (el *Australopithecus garhi*), también con una antigüedad de 2,5 millones de años. Según ciertos indicios, esta especie pudo desarrollar una cultura instrumental, lo que es verosímil dadas las circunstancias ambientales de la época. Sin embargo, esta característica cultural, por sí sola, no nos faculta para distinguir entre protohumanos y prehumanos.

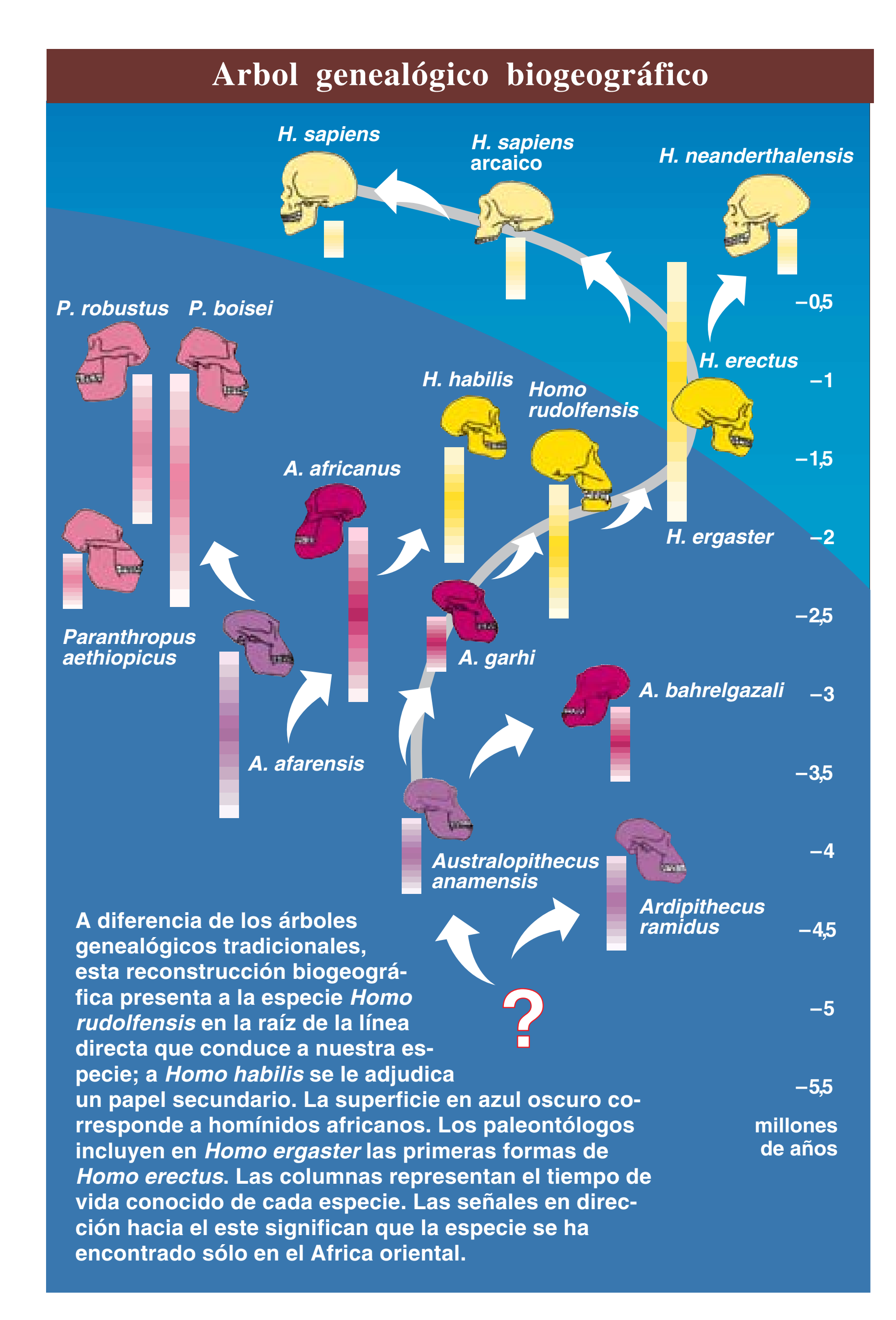
Una vez más, el dispar desarrollo de los homínidos apunta hacia una transformación decisiva en el espacio vital y en las disponibilidades nutritivas que aconteció en Africa hace 2,5 millones de años. La causa desencadenante fue un cambio climático condicionado por procesos globales, regionales y locales. Hace cincuenta millones de años, el clima del planeta era más húmedo y cálido. Desde entonces, la Tierra ha experimentado un progresivo enfriamiento con episodios de glaciación especialmente acusados hace unos 33, 14 y 2,8 millones de años. La temperatura del agua en las profundidades oceánicas —antaño diez grados más alta que en nuestros días— bajó y sobre los continentes se formaron masas de hielo.

El desarrollo del Rift africano experimentó un impulso general y regional. Las laderas se elevaron, dando lugar a poderosas cordilleras junto a la gran fosa. Sobre las cordilleras descargaban la lluvia ingentes masas

Cambio de escena en Africa

En una fase de clima relativamente cálido, hace algo más de tres millones de años, Africa oriental y meridional estaban unidas por una zona boscosa. Hubo grupos de *Australopithecus anamensis* y de *A. afarensis* que se dispersaron y evolucionaron en *A. bahrelgazali* en el oeste y en *A. africanus* en el sur del continente. Hace entre 2,8 y 2,5 millones de años, coincidiendo con un cambio de clima, ahora más frío y seco, las praderas y bosques subtropicales del norte y del sur se retiraron hacia el ecuador. Mientras, en el Africa oriental surgían el *Homo rudolfensis* y los llamados australopitecinos robustos; grupos de *A. africanus* se desplazaron del sur al este de Africa y evolucionaron allí en *Homo habilis*. En estos movimientos biogeográficamente limitados —sumados a los datos anatómicos— reconocemos importantes indicios de que *Homo habilis* procede de un *Australopithecus* del Africa meridional, en tanto que *Homo rudolfensis* partió de un *Australopithecus* del Africa oriental.

Hubo que esperar hasta hace aproximadamente dos millones de años a que los hábitats originales, y con ellos la fauna y flora, volvieran a extenderse hacia el norte y hacia el sur. Según esta hipótesis, los fósiles de *Homo habilis* y de los australopitecinos robustos de Africa meridional no pueden tener una antigüedad superior a los dos millones de años. Así es. Con la ampliación del espacio vital de la zona ecuatorial los homínidos emigraron por primera vez de Africa, como demuestran hallazgos recientes de Europa.



A diferencia de los árboles genealógicos tradicionales, esta reconstrucción biogeográfica presenta a la especie *Homo rudolfensis* en la raíz de la línea directa que conduce a nuestra especie; a *Homo habilis* se le adjudica un papel secundario. La superficie en azul oscuro corresponde a homínidos africanos. Los paleontólogos incluyen en *Homo ergaster* las primeras formas de *Homo erectus*. Las columnas representan el tiempo de vida conocido de cada especie. Las señales en dirección hacia el este significan que la especie se ha encontrado sólo en el Africa oriental.

nubosas procedentes sobre todo del oeste. De ese modo, una gran parte del Africa oriental quedó al abrigo de las precipitaciones. A nivel continental, la temperatura global sólo experimentó el descenso de un par de grados, pero el clima se hizo bastante seco.

Paralelamente al cambio climático se alteraron también los espacios vitales. Dada su posición central en Africa, nuestros hallazgos en el norte de Malawi nos ofrecen la oportunidad de estudiar las emigraciones de los mamíferos entre el este y el sur del continente. Como se adelantó, así esperábamos obtener datos sobre la aparición y la difusión de los homínidos.

¿Cuál es el estado actual de la cuestión? Nos parece plausible la idea de que nuevas especies de homínidos aparecieron en la zona ecuatorial de Africa. La distribución en mosaico de pequeños hábitats ofrecía mejores oportunidades para la evolución de nuevas especies. Lo mismo que ocurre con la fauna, las especies de homínidos vinculadas a un hábitat concreto sólo saltaban sus confines cuando se daban condiciones ecológicas extremas en su espacio vital.

El análisis de las condiciones climáticas y biogeográficas en el corredor de homínidos nos ha permitido esbozar una propuesta de evolución de la especie humana. La resumiremos a partir de un ejemplo: hace algo más de tres millones de años, en una fase de clima relativamente cálido, una zona boscosa unía el este y el sur de Africa. En aquella época un segmento de población de una especie primitiva de *Australopithecus* se extendió por el Africa meridional y evolucionó en *A. africanus*.

Hace entre 2,8 y 2,5 millones de años el continente se hizo más frío y más seco. Los límites de las zonas herbáceas y boscosas subtropicales se desplazaron hacia el ecuador. Entonces, un segmento de población de *A. africanus* ocupó los restos de bosques de ribera y praderas fluviales que quedaron en el Africa oriental, evolucionando allí en *Homo habilis*.

Creemos, por contra, que *Homo rudolfensis* procede de una especie de *Australopithecus* del Africa oriental.

Coincidiendo con una nueva extensión de espacios vitales adecuados, hace unos dos millones de años, *Homo habilis* irrumpió también en amplias zonas del Africa meridional. Se calcula que las primeras emigraciones de homínidos fuera de Africa en dirección norte tuvieron lugar en una época cercana.

Las hipótesis que nos permiten formular nuestros estudios en el Rift de Malawi subrayan la importancia que tienen las investigaciones de los cambios del clima, de las condiciones ambientales y del hábitat para adquirir una visión general del desarrollo de la humanidad. Africa, en cuanto continente, constituye una unidad. Aquí se da la oportunidad única de poder seguir a gran escala las tendencias evolutivas. El interés ya no se ha de centrar en los hallazgos individuales o en yacimientos concretos. Lo que hoy se impone es conseguir una interpretación global panafricana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIE FRÜHZEIT DES MENSCHEN — DER WEG ZUM HOMO SAPIENS. F. Schrenk, C. H. Beck Verlag; Munich, 1998.

AFRICAN BIOGEOGRAPHY, CLIMATE CHANGE AND HUMAN EVOLUTION. Dirigido por T. Bromage y F. Schrenk. Oxford University Press; Nueva York, 1999.

Encontrará más información sobre este tema en la página www.spektrum.de/aktuellesheft.html.

PERFILES

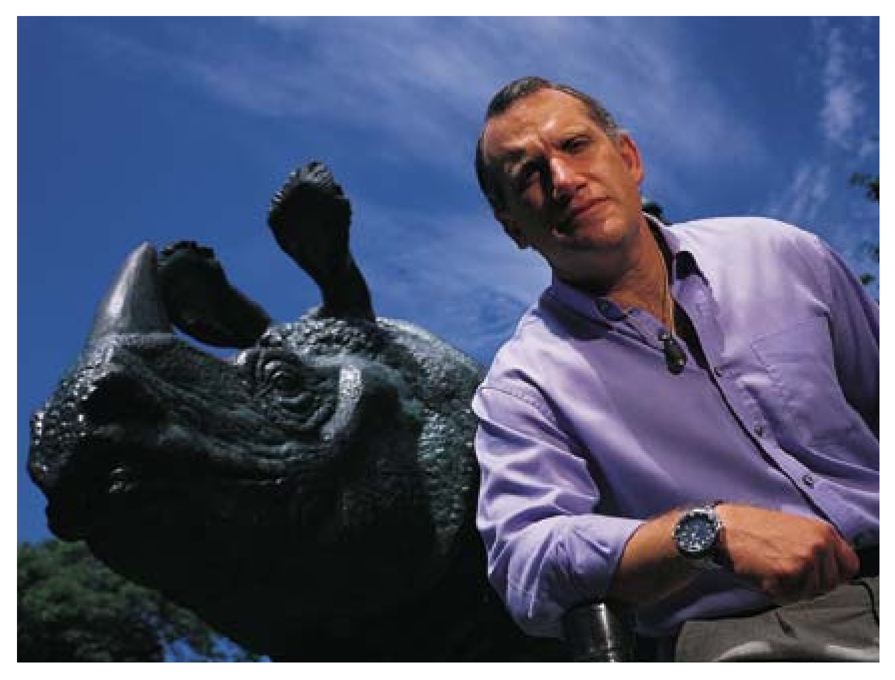
Marguerite Holloway

ALAN R. RABINOWITZ: Salvad los muntjacs

El silencio reina en el bosque al caer la tarde: sólo se oyen las ramas en las copas de los árboles, mecidas por un viento suave, y el crujido de la hojarasca bajo los pies de Alan R. Rabinowitz, director de exploraciones de la Wildlife Conservation Society. Bajamos por la ladera y continuamos por una zona llana del bosque. No se ve ningún animal. Hablamos del paseo placentero, cuando, de pronto se fija en la vaina de un cartucho. "No hay manera de mantenerlos a raya", dice enfurecido. Los cazadores han entrado furtivamente en el terreno acotado, y no hay razón ni amenaza que valga. "Les parece que porque han venido siempre aquí tienen derecho a seguir cazando", continúa, encendido en cólera.

"Aquí" podría ser una selva de Myanmar, Laos, Tailandia, Belice o cualquiera de los muchos países donde ha trabajado Rabinowitz durante los dos últimos decenios para proteger la fauna. Y aunque nos encontramos en una parcela de bosque de sólo 12 hectáreas en el condado de Putnam, a una hora de Nueva York, los temas que le excitan y sacan de sus casillas son los mismos que le atormentan en pleno territorio salvaje.

Rabinowitz, un biólogo sin pelos en la lengua, dinámico y controvertido, ha intervenido directa e indirectamente en los recientes descubrimientos de varias especies de animales. La aparición de mamíferos de tamaño respetable —uno de ellos, el saola (*Pseudoryx nghetinhensis*), es parecido a un antílope— en Vietnam, Laos y Myanmar ha llenado de ilusión a biólogos y amantes de la naturaleza, abrumados en esta era de catástrofes ecológicas, de tinieblas y extinciones. A Rabinowitz, cuyo estudio de los grandes felinos en selvas donde casi no había animales le había deprimido, los hallazgos le han devuelto su optimismo y han cimentado su ya intensa pasión por los animales. "Están, todos esas zonas enormes de tierras salvajes, relativamente inexploradas y sin protección que tenemos que buscar y encontrar y proteger cuando a nadie le importan", me explica más tarde, sentados en el despacho de su casa en lo alto de la colina. Lo más importante, añade Rabinowitz, que recientemente ha sido padre, es el impacto que tienen estos descubrimientos en los más jóvenes: "A los niños se les transmitía un mensaje sin esperanza, y hemos cometido una total injusticia diciéndoles que no queda nada por descubrir."



1. La defensa de la causa de los animales amenazados es una pasión que Alan R. Rabinowitz desarrolló en su niñez, pues siendo tartamudo le atraían los animales. "Yo no podía hablar y ellos tampoco"

Rabinowitz ha conseguido visitar algunas de esas remotas regiones y establecer programas de la Wildlife Conservation Society (que tiene sus oficinas centrales en el Zoo neoyorquino del Bronx) tomando el avión, plantándose allí y empleando un tesón impetuoso. Tras la apertura de fronteras de Laos a los extranjeros, a finales de los ochenta, dio en seguida con la manera de zafarse de los requerimientos gubernamentales que imponían la obligación de viajar en grupos con guía. "Me dirigí a una oscura agencia de viajes de Bangkok —hay muchas de ésas— y me dijeron: Le podemos reservar un viaje guiado, para unas 10 personas, pero todos los nombres serán ficticios, excepto el suyo", explica. "De modo que me fui a Laos, y [un guía] me recibió en el aeropuerto, y le dije: 'Poco antes de salir, todos comieron alguna cosa en mal estado menos yo, que no la comí. Ahora están todos en el hospital en Bangkok. Pero yo he pagado, y quiero ir'."

Tras un pequeño paseo y una propina, Rabinowitz entró en contacto con el gobierno y, al cabo de meses de negociaciones, partió a la exploración de los Montes Annamitas en el sudeste de Laos con algunos colegas. Las Annamitas revestían el máximo interés desde una óptica biológica porque sirvieron como refugio durante los cambios climáticos ocurridos desde hace 2,5 millones de años hasta hace 10.000 años, ofreciendo a los animales entornos aislados y remotos donde evolucionaron de manera distinta de sus parientes instalados en otros refugios. Las exploraciones en la zona ya habían resultado prometedoras: en 1992 los científicos que estudiaban las tierras de Vietnam cerca de la Pista Ho Chi Minh habían encontrado un saola. Poco después, Rabinowitz y otros investigadores que trabajaban justo del

otro lado de la frontera en Nakai Nam Theun, el área protegida más extensa de Laos, encontraron también el saola. Inspecciones posteriores sacaron a la luz una nueva especie de ciervo gruñidor (el muntjac gigante) y un conejo con rayas parecidas a las de la cebra, así como el muntjac de Rooselvet y el cerdo salvaje del Vietnam, que se creía extinguido.

Según el parecer de Rabinowitz, la veta original se encuentra en la zona norte de Myanmar, en un rincón del Himalaya. Con esa idea se propuso convencer al gobierno. Sus esfuerzos desembocaron finalmente en la creación de Hkakaborazi, una zona protegida de 3800 kilómetros cuadrados, después de que una expedición en 1997 revelara aún otra especie de cérvido: el muntjac de las hojas. Rabinowitz y sus colegas encontraron posteriormente un muntjac negro, una oveja azul y una marta, que se suponían confinados en China.



2. Entre las nuevas especies encontradas en el sudeste asiático se encuentra el conejo rayado. Las junglas pueden albergar otros animales desconocidos

Volverá pronto para continuar las observaciones y para llevarles sal a los aldeanos con el fin de acabar con la caza. En Myanmar septentrional, el comercio de animales con la China limítrofe está impulsado por la desesperada necesidad de sal para prevenir las devastadoras consecuencias de la carencia de yodo. El tráfico de miembros de animales ha vaciado muchas junglas del sudeste asiático. En Laos en particular, unas vallas de paja y árboles de varios kilómetros de largo conducen los animales hacia las trampas; en muchos lugares la jungla está completamente silenciosa.

Los viajes le han alejado del ambiente urbano de su niñez. Nacido en Nueva York en 1953, se crió en Brooklyn. Su padre (un profesor de educación física) le adiestró en el levantamiento de pesas. No le ha venido mal en la jungla ser fuerte y estar en forma. Ha superado enfermedades y muchos accidentes: una vez se estrelló en un avión y otra en un helicóptero. Y quizá le haya valido su puesto en la Wildlife Conservation Society, pues fue capaz de mantener un duro ritmo durante una caminata con George Schaller, un eminente biólogo de la sociedad que había estado de visita en la Universidad de Tennessee, donde Rabinowitz daba los últimos retoques a su tesis doctoral sobre los mapaches. Tras la excursión, Schaller le ofreció un trabajo para seguir la pista a los escurridizos jaguares y estimar el tamaño de su población en Belice. "Le dije que sí inmediatamente", recuerda. "Pero no sabía entonces dónde caía Belice".

La fortaleza revistió especial importancia cuando era joven, porque tartamudeaba: "siempre me quedaba el recurso de zumbarle a cualquiera". A pesar de que con frecuencia se sentía desgraciado a causa del tartamudeo (una vez se clavó un lápiz en la mano para evitar hablar en público) dice que está contento de ello. "Ahora me parece que fue una bendición. Me vino bien haber sido tartamudo porque eso me apartó de la gente." Y le acercó a los animales; tenía entre otros una tortuga, un hámster y varias culebras de jaretas. "Les hablaba. Acabé tomando cariño a los animales porque me permitían ser yo mismo", confiesa. "Terminé defendiendo su causa o asociándome con ellos porque los encontraba muy cercanos a mí. Yo no podía hablar y ellos tampoco."

Su alegato ha sido criticado algunas veces, en parte porque Rabinowitz no ha tenido reparos en decir las cosas claras a la gente que vive en las zonas protegidas y se mofa de la idea de "desarrollo viable" tachándola de fantasía de filósofos de salón. Así, se enfrentó con la International Rivers Network, un grupo ecologista y defensor de los derechos humanos, por razón de una presa en Laos. Rabinowitz cree que la presa puede ser una buena idea —si se construye de acuerdo con los planes del Banco Mundial— porque el país no posee una base industrial, porque el área que se va a inundar está "completamente degradada" y porque la gente que será desplazada obtendrá aquello que desea: escuelas y viviendas. "No viven armoniosamente, ni mucho menos. Sufren muchas enfermedades y la mortalidad infantil es muy alta", comenta. "Que vayan allí a vivir con esa gente, y después de haber contraído sus enfermedades díganme qué clase de vida maravillosa llevan."

A pesar de su estribillo de que prefiere los animales a los hombres, Rabinowitz guarda cariño y admiración por las personas con las que ha trabajado en las expediciones, algo que se resalta en dos de sus libros, *Jaguar* y *Chasing the Dragon's Tail*. Por eso se encolerizó cuando un periódico británico le acusó de confabularse con el gobierno militar de Myanmar para expulsar a los miembros de la tribu Karen de un parque nacional. "Ni siquiera nos acercamos a esa zona", dice, abriendo un mapa: Hkakaborazi está al norte, en la frontera con el Tíbet; la región conflictiva de los Karen se halla al sudeste. "Me gustaría ir a la región de los Karen, pero no puedo porque están en guerra civil."

Rabinowitz ya está pensando en otros lugares que puede estudiar o proteger. "Muchas noches, en las que estoy cansado, o aburrido, o lo que sea, me enfrasco en los mapas y busco los lugares del mundo que por razones políticas o por cualquier otra causa se hayan abierto", dice. "La exploración no consiste sólo en encontrar algo que nadie antes había visto o hallar una nueva especie. Es también contemplar el mundo de otra manera."

CIENCIA Y SOCIEDAD

Regulación génica

Factores nucleares hepatocíticos

La especialización funcional de un tejido está escrita en los genes. Hay que buscarla en la activación y expresión selectiva de un repertorio de genes que cifran distintas clases de proteínas específicas del tipo celular que compone el tejido en cuestión.

El hígado es un órgano formado por hepatocitos. Estas células especializadas se encargan de asegurar el cumplimiento de las funciones hepáticas. Al hígado le compete, en efecto, metabolizar glúcidos, lípidos y urea, sintetizar la mayoría de las proteínas plasmáticas y eliminar compuestos que son tóxicos para el organismo.

La mayoría de las proteínas específicas responsables de las funciones hepáticas se sintetizan, casi exclusivamente, en el hepatocito; muy raramente en otros órganos. Tal producción selectiva obedece a la existencia de potentes mecanismos de control; el principal se da en el dominio de la transcripción génica. Los factores de transcripción son proteínas nucleares que interaccionan con secuencias específicas de ADN existentes en los promotores de los genes hepáticos. Corresponde a estos factores regular la expresión de dichos genes.

Sabemos ahora que en los promotores de los genes hepáticos se suceden grupos de secuencias "consenso" para distintos factores de transcripción. Algunos de estos factores son ubicuos, es decir, se encuentran en toda clase de tejidos; otros, sin embargo, son específicos del hígado y órganos con el mismo origen embrionario, tal como el páncreas.

A los específicos se les ha llamado factores nucleares hepatocíticos (HNF). Funcionan de manera cooperativa; el efecto que ejercen, pues, sobre la expresión de un gen determinado depende de las interacciones con otros factores de transcripción, bien sean factores nucleares hepatocíticos o factores ubicuos. Se trata de un mecanismo harto eficaz para generar diversidad y especificidad en la expresión génica.

En cuanto a su naturaleza bioquímica, los factores nucleares hepatocíticos no constituyen un grupo de proteínas homogéneo, sino bastante heterogéneo. Entre los HNF se numeran miembros de distintas clases de familias multigénicas de factores de transcripción, con distintos orígenes evolutivos, distintas estructuras proteicas y distintas propiedades de regulación.

Las familias se dividen en HNF-1, con dos miembros HNF-1 α y HNF-1 β, HNF-3 con tres miembros HNF-3 α, β y γ, algunos miembros de la superfamilia de receptores nucleares como por ejemplo HNF-4 α, y por último HNF-6 y la familia C/EBP.

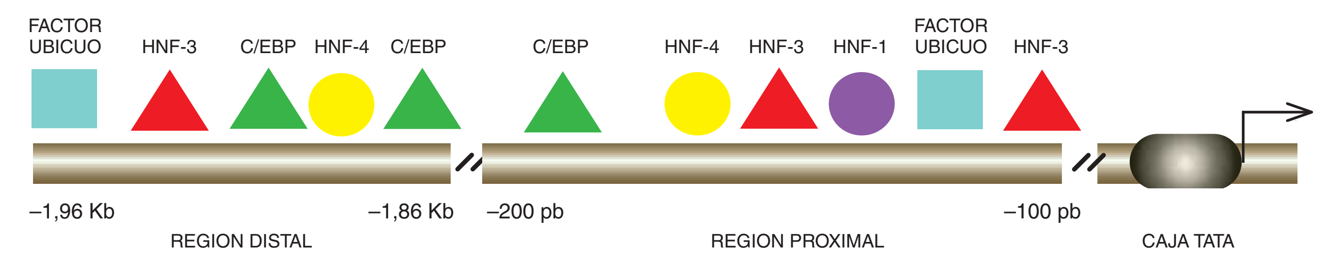
La estructura de las proteínas de los miembros de una misma familia son muy similares y constan de determinados dominios o regiones que las diferencian de otras familias; además reconocen el mismo tipo de secuencia consenso en los promotores de los genes a los que regulan. Con todo, pueden darse ciertas divergencias entre miembros de una misma familia; así, en el efecto ejercido sobre la expresión de un gen determinado y su expresión diferencial durante el desarrollo embrionario o en distintos tipos de tejido.

El enriquecimiento de los factores nucleares hepatocíticos en el hígado o el páncreas se debe también a la expresión de los genes que los codifican restringida a estos tipos de tejidos. La estructura de los promotores de los genes de los HNF es muy similar a la de los genes hepáticos en general. Contienen secuencias "consenso" para factores ubicuos y para otros HNF, lo que induce a pensar en una posible interregulación entre HNF, así como en una red jerárquica de regulación.

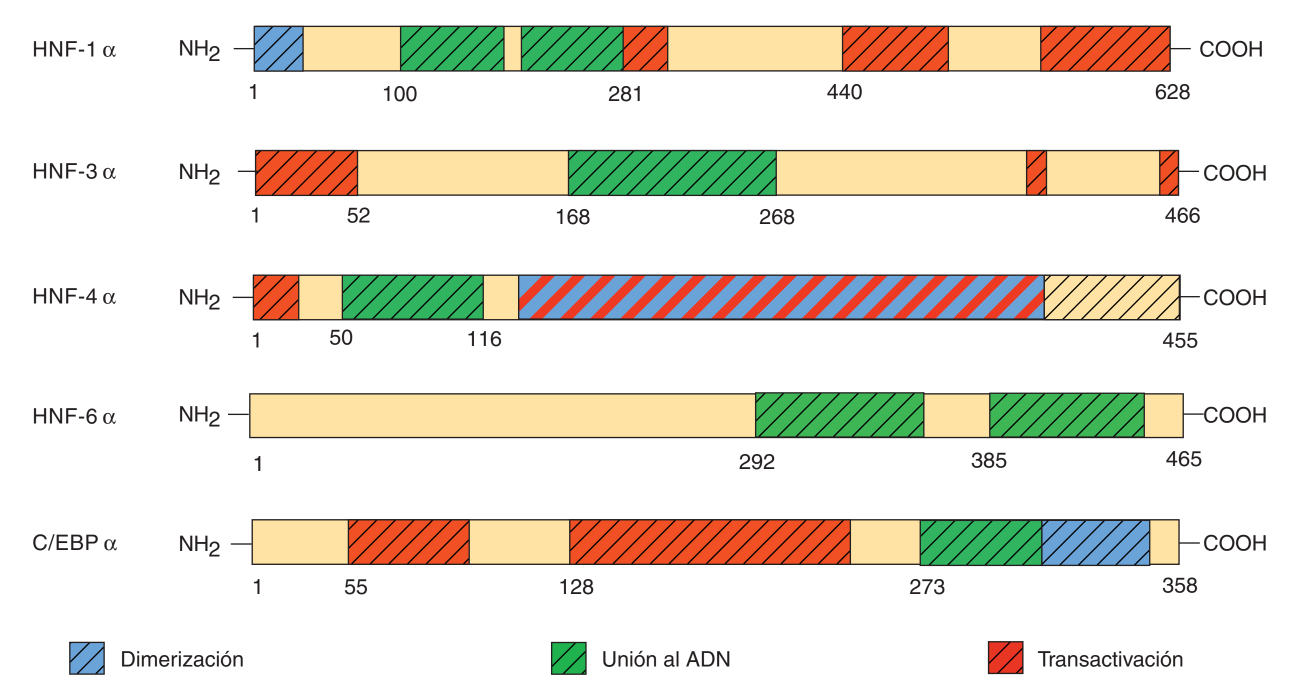
La hipótesis de la jerarquía viene respaldada por la expresión secuencial de los factores nucleares hepatocíticos durante el desarrollo embrionario. El hígado adulto se origina del endodermo, al igual que otros órganos internos tales como el páncreas o el epitelio del tracto gastrointestinal.

En el camino hacia la diferenciación del hepatocito se suceden una secuencia de estados morfológicos, etapas que se han correlacionado con la inducción de diferentes factores nucleares hepatocíticos. Así HNF-3 β y HNF-1 β se expresan en etapas muy tempranas del desarrollo, seguido de HNF-4 α, y algo más tarde de HNF-1 α.

La incidencia decisiva de estos factores de transcripción en el proceso embrionario ha dificultado el estudio de las consecuencias genéticas de su inactivación. Por ejemplo, en ratones, la inactivación de HNF-3 β o HNF-4 α provoca la muerte del em-



1. Arquitectura del promotor del gen TTR. El gen TTR es un gen hepático que cifra una proteína plasmática. A lo largo de ambas regiones, distal y proximal, se suceden secuencias consenso para distintos HNF, así como para factores ubicuos. La expresión del gen está determinada por la interacción de una combinación de estos factores de transcripción



2. Los HNF son proteínas dotadas de una estructura modular, constituida por dominios funcionalmente independientes. Estos dominios incluyen las regiones implicadas en el reconocimiento y unión a la secuencia específica de ADN (en verde), *dominios de dimerización* (en azul) *que permiten la formación de homo o heterodímeros y dominios de transactivación* (en rojo) *que están directamente implicados en la activación del proceso de iniciación de la transcripción. En razón de la familia, los dominios presentarán una disposición y una estructura concreta. Los dominios de unión al ADN tienen una estructura distinta y característica de cada familia. Ejemplos son los homeodominios que caracterizan a HNF-1 y HNF-6, las hélices alfa que constituyen una estructura "alada" en la familia HNF-3, los "dedos de zinc" de HNF-4 o la estructura en "cremallera de leucina" que caracteriza al dominio de unión al ADN de la familia C/EBP*

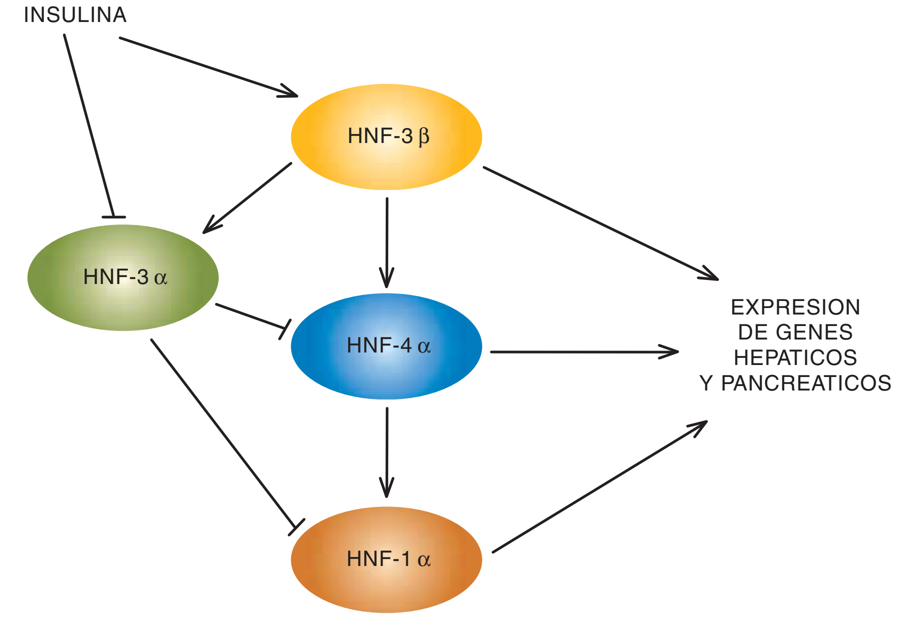
brión en estadios tempranos del desarrollo.

En los laboratorios de biología molecular y enfermedades metabólicas de la Universidad Rockefeller estamos investigando la red de regulación existente entre estos factores de transcripción. Partimos de un nuevo enfoque genético que permite estudiar los efectos de la inactivación de los HNF.

Por modelo de trabajo nos servimos de cuerpos embrionarios, que, sabido es, se forman a partir de células madre de ratón; éstas, cultivadas en suspensión, tardan sólo dos semanas en desarrollar ectodermo, mesodermo y endodermo visceral. En el endodermo visceral se expresan los genes HNF y la regulación de la expresión génica refleja lo que ocurre en hígado y páncreas.

Si eliminamos uno de estos genes en células madre mediante recombinación homóloga, podremos obtener cuerpos embrionarios que carecen de ese gen y así analizar la contribución peculiar del mismo a la regulación de la transcripción génica en el contexto celular.

Hemos descubierto que HNF-3 β se encuentra a la cabeza de la pirámide jerárquica de regulación, pues es un activador de la expresión de los ge-



3. Entramado de regulación de los factores nucleares hepatocíticos. HNF-3 β es un activador de la red de regulación. HNF-3 α contrarresta esta activación. La relación HNF-3 β/HNF-3 α es clave para la expresión neta de los genes hepáticos y pancreáticos. Se trata de una relación que puede ser modulada por insulina

nes para HNF-3 α y HNF-4 α. Por contra, HNF-3 α actúa como un regulador negativo de HNF-4 α, que a su vez es un activador de HNF-1 α, de lo que se infiere que HNF-3 β y HNF-3 α tienen funciones reguladoras antagonistas. Parece, pues, que la relación entre estos dos factores resulta ser crucial para la regulación de los genes hepáticos o pancreáticos. De entrada ha quedado determinada la intervención de la insulina en esa relación.

El tipo de regulación jerárquica y modulable que caracteriza a los factores nucleares hepatocíticos no se limita al proceso de diferenciación celular; mantiene también el correcto funcionamiento del órgano desarrollado. En este sentido, los HNF controlan la expresión de muchas de las proteínas necesarias para el metabolismo de los glúcidos en el hígado o la expresión del gen de la insulina en el páncreas. De hecho, mutaciones que implican una expresión reducida de HNF-4 α, HNF-1 α o HNF-1 β en el hombre, producen tres subtipos de la forma juvenil de diabetes mellitus no dependiente de insulina: MODY1, MODY3 y MODY5, respectivamente. Esta forma de diabetes se caracteriza por un defecto en la secreción de insulina y en la expresión de ciertos genes implicados en el metabolismo de la glucosa. La estrecha interregulación entre estos factores y el resto de los HNF sugiere que otros miembros de este complejo circuito regulador podrían participar asimismo en otras formas de diabetes mellitus no dependiente de insulina.

María Angeles Navas Hernández
Laboratorio de enfermedades metabólicas
Universidad de Rockefeller, Nueva York

El combustible nuclear

El 2 de diciembre de 1942, en plena Segunda Guerra Mundial, Enrico Fermi y su equipo de colaboradores consiguieron la primera reacción nuclear de fisión en cadena; el experimento tuvo lugar en una pista de "squash" situada en un sótano de la Universidad de Chicago.

Se culminaba en ese punto la investigación que años atrás había emprendido en la Universidad de Roma bombardeando con neutrones todos los elementos, uno tras otro, de la tabla periódica. Al llegar al último, el uranio, un fenómeno nuevo y difícil de entender tenía lugar. Las mejores cabezas de Francia, Alemania e Inglaterra se empeñaron en descifrar aquel galimatías; porque tal nombre merecía el que bombardeando uranio, el más pesado de los elementos, con neutrones poco energéticos, aparecieran nucleidos de la zona intermedia de la tabla periódica.

Fue Otto Hahn con su equipo en el Instituto Kaiser Wilhem de Berlín quien hizo las medidas más finas, que permitieron pocas semanas después que Lise Meitner y Otto Frish interpretaran adecuadamente lo que ya se llamaba el "Experimento de Fermi". Lo que sucedía se expresa simbólicamente en la ecuación siguiente:

$$n_0^1 + U_{92}^{235} \rightarrow F_{b1}^{a1} + F_{b2}^{a2} + \nu n_0^1 + \text{energía} \qquad (1),$$

que representa que el U_{92}^{235} (nucleido que sólo supone el 0,7 % del uranio natural total), al capturar un neutrón, n_0^1, se rompe en dos fragmentos F_b^a (*b* representa el número de protones y *a* el número total de protones + neutrones), produciéndose al mismo tiempo una cantidad enorme de energía (~200 MeV), y unos cuantos neutrones ν, (por término medio ~2,5), que pueden continuar induciendo más fisiones, según un proceso típico de reacción en cadena.

La energía de la ecuación (1) se ha adjetivado de enorme por comparación con la generada en una reacción química, que produce menos de 1 electronvolt, frente a los 200 millones que produce la fisión. Por otra parte, los fragmentos F_b^a explican la aparición "inexplicable" de nucleidos de peso atómico intermedio de la tabla periódica.

La ecuación (1) como interpretación del "experimento de Fermi" provocó una auténtica convulsión. El mundo estaba embarcado en una guerra feroz. Era evidente que quien fuera capaz de controlar una energía como la recientemente descubierta ganaría la guerra. Y así surgió el Proyecto Manhattan cuyo resultado final fueron las bombas de Alamogordo (experimental) y las de Hiroshima y Nagasaki. La primera y la tercera fueron de Pu239, y la segunda de U235.

Naturalmente, se había tenido que realizar un gran esfuerzo de investigación, en el que se obtuvieron entre otros los siguientes resultados:

1) El uranio natural consta básicamente de dos isótopos, a saber: el U235 (0,7 % del total), es fisionable con neutrones de cualquier energía según reacciones nucleares similares a la (1); el U238 sólo es fisionable con neutrones de energías superiores a 1,1 MeV, siendo además un absorbente parásito de neutrones en el intervalo aproximado de 6 electronvolt a 1 KeV.

2) En las capturas neutrónicas del U238 se produce un nuevo elemento, el plutonio, cuyo isótopo 239 tiene propiedades fisionables casi idénticas al U235. Las reacciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} U_{92}^{238} + n_0^1 &\rightarrow U_{92}^{239} + \gamma \\ U_{92}^{239} &\xrightarrow[\beta]{} Np_{93}^{239} + \beta_{-1}^{0} \\ Np_{93}^{239} &\xrightarrow[\beta]{} Pu_{94}^{239} + \beta_{-1}^{0} \end{aligned} \qquad (2),$$

donde el símbolo γ representa un cuanto de radiación y, β_{-1}^0 un electrón (masa cero y una carga eléctrica negativa).

3) Los neutrones de fisión nacen con un espectro continuo de energías, con un valor máximo de unos 10 megaelectronvolt y un promedio de 2 MeV. Con esta velocidad inicial, o bien escapan del sistema, o bien comienzan a interaccionar con los núcleos del medio, según reacciones de dispersión, en las que pierden energía, o reacciones de absorción, en las que desaparecen.

4) Es imposible la utilización del uranio natural para conseguir la reacción en cadena automantenida necesaria en una máquina de generación de energía (o en una explosión), a cuenta del gran contenido de U238 (poco fisionable y muy absorbente).

Agua

El enlace de hidrógeno

Hay muchas formas de interacción posibles entre las moléculas; una de ellas, el enlace de hidrógeno, es de una complejidad e importancia singulares, sobre todo en los organismos. En el enlace de hidrógeno dos moléculas vecinas comparten un átomo de hidrógeno de una de ellas. Sólo puede establecerse el engarce si el átomo está casi alineado con las dos moléculas.

Los enlaces de hidrógeno dan al agua su alta tensión superficial. Esta propiedad cuenta mucho en los sistemas biológicos porque promueve la interacción atractiva entre sustancias hidrófobas, fenómeno de sumo interés en la creación de autoensamblajes (las membranas celulares, por ejemplo). De manera similar, en la formación de la estructura terciaria de las proteínas intervienen fuerzas hidrófobas entre aminoácidos apolares.

La molécula de agua dibuja una V abierta: los dos enlaces intramoleculares forman un ángulo de unos 104º, muy parecido a los de los vértices de los tetraedros, y en el hielo (la forma ordenada) cada molécula tiene cuatro enlaces de hidrógeno, con las cuatro más próximas.

Los enlaces duran muy poco en el agua líquida: se rompen unas 10^{12} veces por segundo. En cada instante, alrededor del 60 por ciento de los enlaces posibles están intactos (a temperatura ambiente) y constituyen una gran red desordenada, similar a la que tejen las uniones en un gel polimérico. Las tres propiedades —gran número, simetría tetraédrica y vida corta— de los enlaces de hidrógeno en el agua líquida explican la mayoría de las peculiares características de ésta. Pongamos unos ejemplos.

5) Existe otro nucleido en la naturaleza, el torio, que hace el número 90 en la tabla periódica; aunque no es fisionable, es "fértil" (como el U238), según las siguientes ecuaciones análogas a las (2).

$$
\begin{aligned}
Th^{232}_{90} + n^{1}_{0} &\rightarrow Th^{232}_{91} + \gamma \\
Th^{233}_{91} &\xrightarrow[\beta]{} Pa^{233}_{91} + \beta^{0}_{-1} \qquad (3)\\
Pa^{239}_{93} &\xrightarrow[\beta]{} U^{233}_{92} + \beta^{0}_{-1}
\end{aligned}
$$

El U233 producido es fisionable, y tiene aproximadamente las mismas características que el U235.

Según lo dicho, a partir del uranio y el torio existentes en la naturaleza, se pueden obtener de forma más o menos compleja los nucleidos fisionables U235, Pu239 y U233, que pueden utilizarse en los reactores nucleares o en los explosivos atómicos.

El U235 puede obtenerse por separación isotópica de los nucleidos que constituyen el uranio natural, según un proceso extremadamente caro.

El Pu239 puede obtenerse, según las reacciones (2), mediante el bombardeo con neutrones de un uranio con contenido adecuado en U238; procediendo después a la separación química del Pu239 del resto de los elementos producidos. Este procedimiento requiere un reactor nuclear especial (plutonígeno) que sirva de base a las reacciones (2); y a continuación un proceso de separación química.

Por último el U233 puede producirse de forma análoga al Pu239, incorporando el torio al reactor de base [reacciones (3)]. Este combustible sólo se ha utilizado en ensayos experimentales.

Refiriéndonos exclusivamente a las aplicaciones pacíficas de la fisión, es decir, a los reactores nucleares, el estado físico y químico en que los materiales fisionables se incorporan al reactor nuclear depende del tipo de reactor. Es pertinente, por tanto, establecer una clasificación, si bien somera, de los distintos tipos de reactores nucleares.

Atendiendo a las del espectro energético donde tienen lugar las fisiones, los reactores pueden ser rápidos o térmicos. En los primeros las fisiones tienen lugar a altas energías, es decir, alrededor de la energía promedia de nacimiento, (2 MeV). La razón de existir de este tipo de reactores es que, debido a problemas de economía neutrónica, la probabilidad de ocurrencia de las reacciones (2) aumenta, con lo que pueden producirse incluso más núcleos de Pu239 que los de U235 que se consumen; dicho de otra forma son "reproductores". En este caso, y también por razones de economía neutrónica, el combustible ha de ser muy enriquecido en U235 o en Pu239 (mayor, en general, del 50 %).

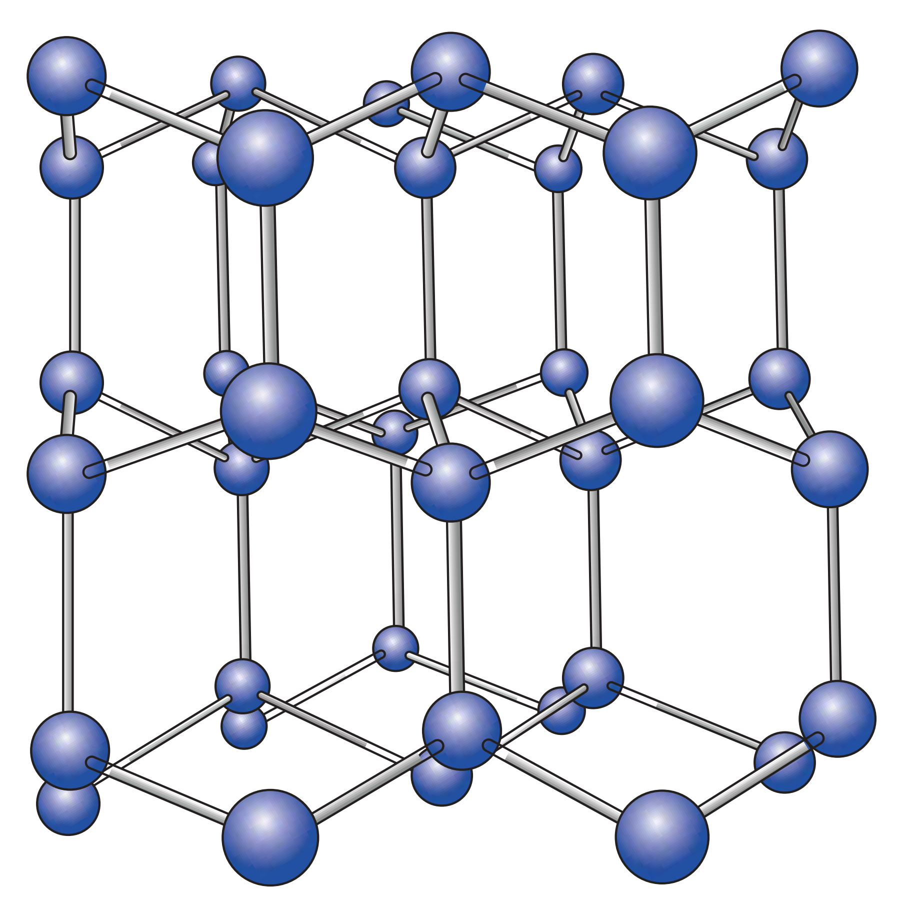
En otro tipo de reactores, llamados "térmicos", se incorpora un material ligero al sistema (D_2O, H_2O o C), para desplazar el espectro neutrónico hacia las bajas energías, donde la probabilidad (σ_f) de fisión del U235 (o del Pu239 o U233) es mucho más alta y, por tanto, no es necesario un enriquecimiento tan alto en U235; incluso con dióxido de deuterio o grafito como moderador se puede usar el uranio natural. Estos reactores tienen el inconveniente de no ser "reproductores".

El uso de los distintos moderadores mencionados en el párrafo anterior se traduce en 3 tipos de reactores, todos ellos con bajo enriquecimiento en U235; incluso en los de D_2O o grafito puede ser uranio natural; mientras que en los de H_2O (de mayor absorción neutrónica) ha de haber un cierto enriquecimiento, aunque en general no pasa del 4 % o 5 % en U235.

Por otra parte, el combustible puede estar agrupado en "islotes" inmersos en el moderador o en el refrigerante; son los reactores llamados heterogéneos; o puede estar disuelto, para lo cual previamente ha de convertirse en un compuesto soluble; reciben el nombre de reactores homogéneos. Estos presentan graves problemas de corrosión, mientras que los heterogéneos tienen la ventaja de manejar muy cómodamente el combustible (en "barrita").

En los reactores térmicos la heterogeneización obedece también a razones de economía neutrónica, puesto que el efecto de autoapantallamiento debido a la absorción parásita preferente en la superficie del "islote" es predominante en el U238 (captura parásita) sobre el U235 (fisión), cuando el contenido en U238 es alto.

RAFAEL CARO
CIEMAT
Madrid



Estructura cristalina de forma hexagonal del hielo (forma corriente). Las esferas representan los átomos de oxígeno y los trazos entre las esferas los enlaces de hidrógeno. Los átomos de hidrógeno no están representados. Nótese que cada molécula forma enlaces con 4 moléculas vecinas

Si el agua se enfría a partir de la temperatura ambiente, la densidad aumenta, como era de esperar, hasta los 4º, pero de ahí a los 0º (o aún menos, si puede evitarse la nucleación de hielo) disminuye drásticamente. El hielo es menos denso que el agua líquida. Se comprende el porqué de esta "anomalía" cuando se cae en la cuenta de que, al bajar la temperatura, el número de enlaces de hidrógeno intactos crece y a cada molécula la rodean menos vecinas, cuatro en el hielo, muchas menos que en la disposición compacta de esferas, donde el número de vecinas es 12. Por tanto, cuanto menor sea la temperatura, mayor será el volumen ocupado por cada molécula. Que el hielo sea menos denso que el agua tiene consecuencias muy importantes: el que se derritan los icebergs en la superficie de los océanos, por ejemplo, o la erosión que la formación de hielo en los poros de las rocas produce.

Otro ejemplo revelador del interés de los enlaces de hidrógeno guarda relación con su energía, que es muy alta, alrededor de 13 kilojoule por mol, igual a la energía térmica a unos 1500 K. Si la interacción fuese esférica (isótropa), el agua sería siempre sólida a temperatura ambiente, pero como el enlace de hidrógeno es muy direccional los rápidos movimientos de los ligeros átomos de hidrógeno lo rompen con facilidad. La elevada energía del enlace explica que la capacidad calórica del agua sea tan grande y que el clima, sobre todo cuando el tiempo es húmedo, tenga estabilidad.

Un tercer ejemplo es más sutil. Aplicar una presión a un líquido es hacer que sus moléculas estén más cerca unas de otras. Intuitivamente, el desplazamiento relativo de las moléculas debería ser más difícil, es decir, la viscosidad debería aumentar con la presión; así ocurre en todos los líquidos, menos en el agua. En ésta la presión destruye el orden tetraédrico y crea planos de formaciones moleculares hexagonales que se deslizan mejor y reducen la viscosidad. Una consecuencia importante es el movimiento de los glaciares.

Un descubrimiento hasta cierto punto reciente pone de manifiesto otro punto de interés de los enlaces de hidrógeno. El experimento consiste en la aplicación de presiones moderadas al hielo normal a una temperatura muy baja. A los 12 kilobares se produce una espectacular transición de fase: el sólido cristalino se contrae; su volumen se reduce en más de un 25 %. Retirada la presión, no hay cambio estructural. Un examen detallado de la estructura muestra que la red de enlaces de hidrógeno no está ordenada y consiste en una forma muy densa del agua amorfa. El número de vecinas próximas sigue siendo de cerca de 4, pero el volumen libre que queda en el hielo se llena con moléculas intersticiales. Al aumentar la temperatura y llegar a los 125 K se produce una brusca transición de fase, acompañada de una gran expansión que devuelve a la muestra la densidad del hielo. La nueva forma también es amorfa, pero su estructura se parece a la del agua líquida. Un nuevo aumento de la temperatura crea una forma cúbica de hielo cristalino, y finalmente se regenera la hexagonal de costumbre, con la que empezó el experimento.

Todas estas transiciones de fase corresponden a disposiciones de los enlaces de hidrógeno distintas, y muestran que variaciones hasta cierto punto pequeñas de las condiciones externas (presión, temperatura) generan formas muy diferentes de estructura del agua.

Uno de los desarrollos más recientes se refiere a la estructura del hielo a presiones sumamente altas, en el límite de las técnicas actuales. Cuando dos moléculas de agua crean un enlace de hidrógeno, el hidrógeno de una de ellas es compartido por su vecina. Más exactamente, en el hielo o en el agua líquida, la distancia entre dos moléculas vecinas es de 0,28 nanómetros y el átomo de hidrógeno está a 0,1 nanómetros de un oxígeno y a 0,18 nanómetros del otro. Cuando la presión llega a 1,4 megabares las moléculas se han acercado tanto, que el átomo de hidrógeno está justo en el punto medio entre los dos oxígenos. En ese caso extremo no hay enlaces de hidrógeno y ni siquiera moléculas de agua distinguibles. Esta forma sólida (denominada hielo X) es en realidad una aleación, con un tercio de átomos de oxígeno y dos de átomos de hidrógeno.

JOSÉ TEIXEIRA
Laboratoire Léon Brillouin
(CNRS/CEA) Gif-sur-Yvette

De cerca

Textos: M. Montserrat Sala y Dolors Vaqué
Fotos: M. M. Sala, D. Vaqué, M. Delgado y J. I. Calderón-Paz

Ciliados marinos

Los ciliados son organismos microscópicos unicelulares, generalmente planctónicos. Prosperan en ríos, lagos, mares y océanos. Se caracterizan por presentar cilios, estructuras que rodean la célula entera o parte de la misma. De los cilios se valen para desplazarse y crear corrientes que lleven alimento hacia su boca.

La forma de los ciliados es, en unos, esférica; en otros, elipsoidal. Los hay también cónicos y cilíndricos. Su tamaño oscila entre cinco y 200 micrometros. Algunos, así los tintínidos, desarrollan un caparazón transparente alrededor de la célula; otros carecen de lórica, que es como se llama dicha coraza.

Los encontramos en sus ecosistemas acuáticos que oscilan en densidades entre 100 y 100.000 células por litro. En el mar Mediterráneo, por ejemplo, pueden alcanzar concentraciones de hasta 10.000 células por litro en la costa y del orden de 100-1000 células por litro en mar abierto. Predominan los géneros *Strombidium*, *Strobilidium, Tontonia*, *Mesodinium* y diversos tintínidos.

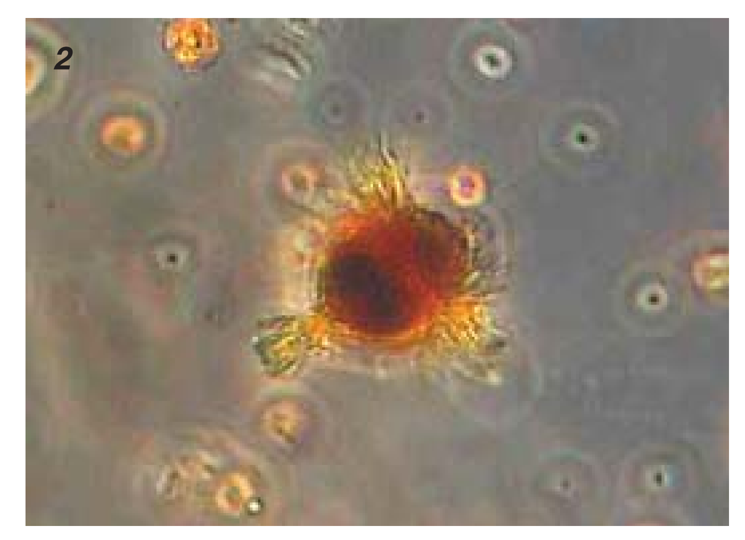
La mayoría se alimentan de organismos de menor tamaño: bacterias, fitoplancton y pequeños protozoos. Se han descrito casos de canibalismo; se sabe que *Didinium* ingiere otros ciliados de su misma talla. Algunas especies están capacitadas para llevar a cabo la función fotosintética, mientras que otras se nutren de organismos y realizan la fotosíntesis. Estos últimos gozan, pues, de una ventaja envidiable, ya que pueden combinar los dos tipos de alimentación y sobrevivir en circunstancias adversas.

En los copépodos encuentran los ciliados sus principales depredadores; no es infrecuente que esos crustáceos diminutos prefieran los ciliados a las algas y otras presas habituales. Los ciliados representan un paso intermedio en el flujo de carbono en la cadena alimentaria, desde la base (bacterias y algas) hasta copépodos, fuente de alimentación de las larvas de peces.



Tintínido de 75 micrometros envuelto por la lórica

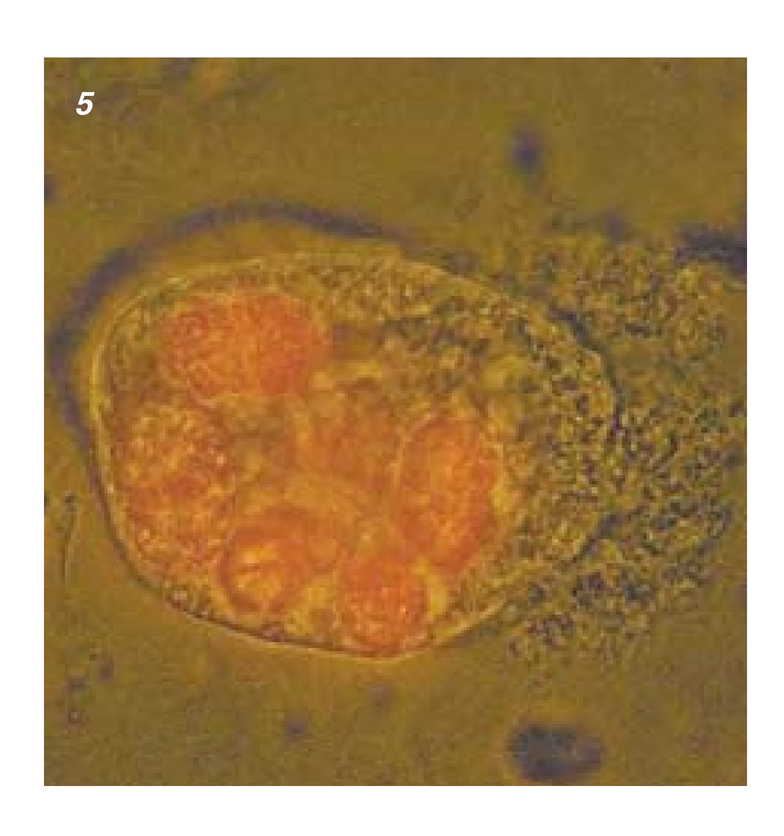
Mesodinium (izquierda) *y* Strombidium (derecha)*, ambos de 8 micrometros*

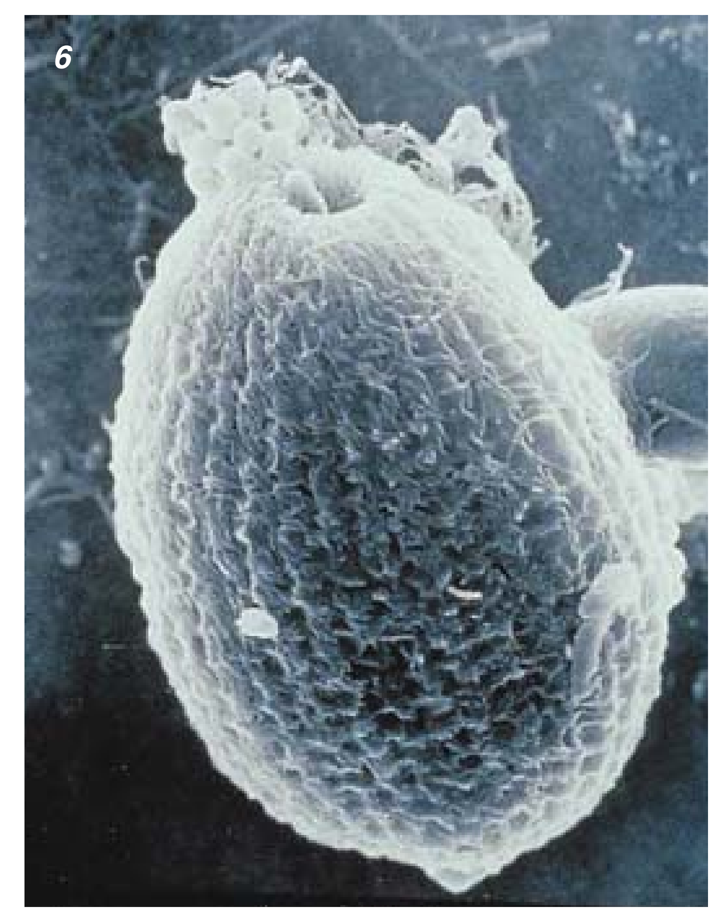






Strobilidium
de 30 micrometros





Ciliado de 50 micrometros después de haber ingerido varias algas, en rojo (izquierda). *Ciliado de 25 micrometros sorprendido ingiriendo bacterias por la boca* (derecha)

Cirugía cardíaca avanzada

Los cirujanos operan ya el corazón sin necesidad de suspender la actividad del mismo. Las técnicas empleadas convierten la intervención en un procedimiento más seguro y económico

Cornelius Borst

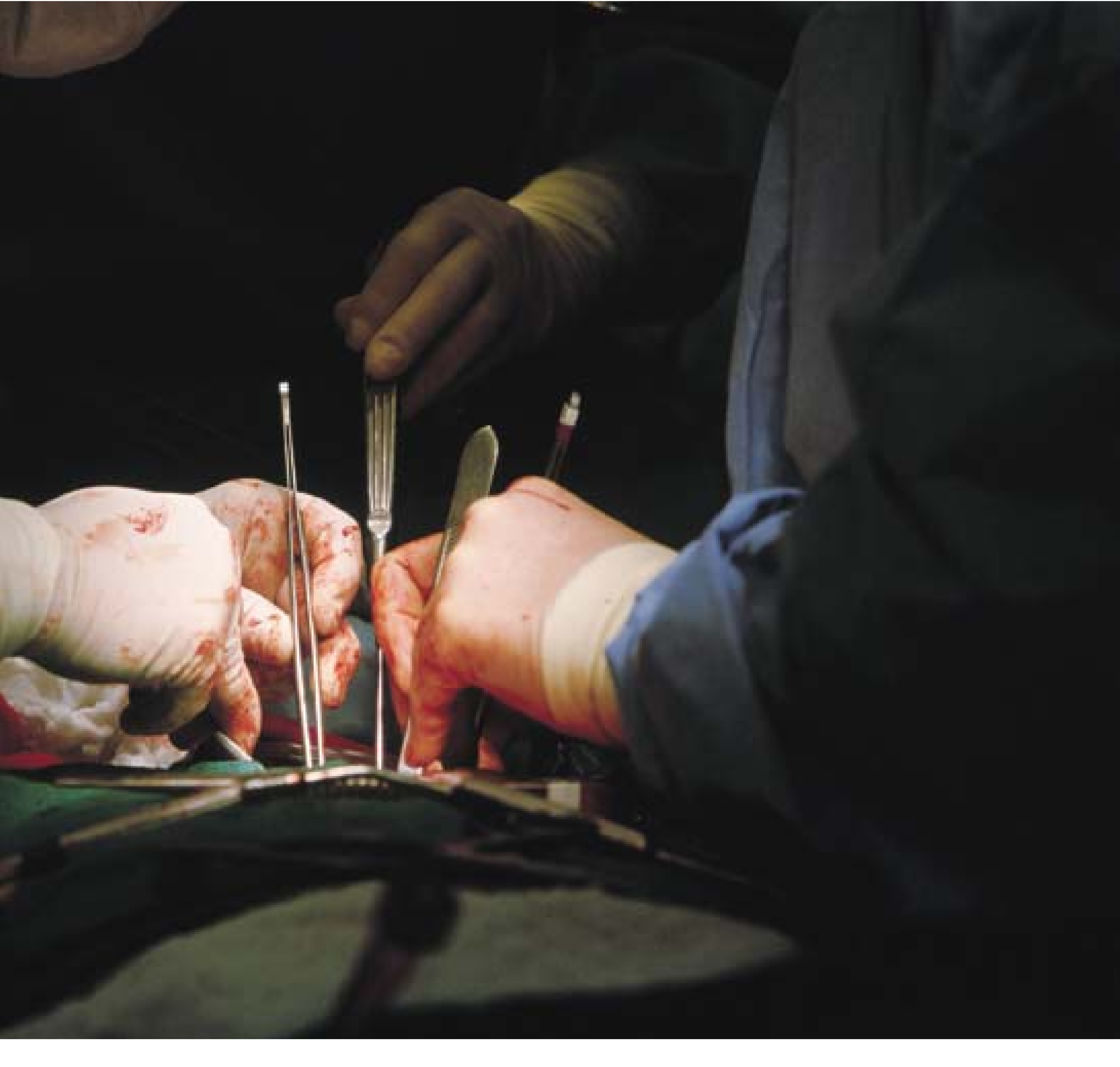


Después de subir los escalones del primer piso, el señor Petit tiene que descansar en el rellano antes de iniciar el segundo tramo. Siente como si un elefante le oprimiera el pecho con su pata. El dolor es consecuencia del bloqueo de las arterias coronarias, los vasos que aportan sangre rica en oxígeno a los músculos del corazón. Necesita una intervención quirúrgica de derivación (un *bypass*), pero no dispone ni del dinero, ni del tiempo prolongado que requerirá su hospitalización. (El costo de la intervención en Europa es de unos cuatro millones de pesetas y en los Estados Unidos más o menos el doble.)

La señora Vázquez es una mujer de edad avanzada que sufre dolores en el pecho al menor movimiento. En levantarse y vestirse tarda una hora, por lo menos. Necesita, y con cierta urgencia, un puente coronario. Por fortuna vive cerca de un hospital con un departamento de cardiología, y su seguro pagará la intervención. Pero la señora Vázquez tiene problemas respiratorios y una enfermedad renal y acaba de salir de un ictus. El cirujano cardiovascular considera que es muy peligroso intervenirla.

El señor Bejarano lleva un pequeño negocio de informática desde su casa. Necesita un puente triple, pero teme que la intervención le obligará a dejar el negocio, pues piensa que debilitará su capacidad como programador. Una intervención cardíaca puede en ocasiones alterar la función cerebral de un paciente, y el señor Bejarano no quiere correr ese riesgo. (El señor Petit, la señora Vázquez o el señor Bejarano representan retratos que se extraen o componen fácilmente después de ver numerosos pacientes.)

La intervención para colocar un puente de coronarias es bastante habitual: cada año se someten a ella unas 800.000 personas de los cuatro puntos cardinales. Pero la intervención es cara y arriesgada. Para desviar el flujo de sangre alrededor de un bloqueo de las arterias coronarias, los cirujanos deben injertar otros vasos (del tórax y de la pierna del paciente) en el vaso enfermo allende la obstrucción. Antes, sin embargo, han de "desgarrar" el pecho (sierran en efecto el esternón y mantienen bien abierta la caja torácica). Durante una hora



1. **LA CIRUGIA DE DERIVACION CORONARIA clásica, como muestra la fotografía, obliga al "desgarro" de la caja torácica del paciente, parada del corazón y conexión con una máquina corazón-pulmón para hacer circular sangre y oxígeno. La recuperación subsiguiente puede durar meses. Recientemente los cirujanos han empezado a intervenir ya sin suspender el latido cardíaco y con la caja torácica cerrada.**

paran el corazón, pues no pueden suturar bien un vaso del corazón mientras éste siga latiendo (se halle activo).

Todo el tiempo que el corazón esté detenido, el paciente permanece conectado a una máquina que suple el corazón y los pulmones, y hace circular artificialmente la sangre que suministra el oxígeno a los tejidos del organismo, hasta que los médicos vuelvan a poner en marcha la víscera. Esta máquina tan compleja penetró en la moderna cirugía cardíaca hace unos 40 años. Pero la circulación artificial que proporciona el artilugio continúa creando problemas serios, especialmente en los pacientes débiles o de edad. Esas complicaciones explican la estancia postoperatoria prolongada en el hospital (de seis a ocho días) y, a menudo, el período de convalecencia de dos o tres meses. Además, ciertos enfermos soportan muy mal la abertura de la caja torácica y se muestran sensibles a pulmonías y otras infecciones, en la fase de convalecencia.

A mediados de los años noventa surgieron dos técnicas quirúrgicas para facilitar los puentes o derivaciones coronarias. Varios investigadores comenzamos a examinar la posibilidad de descartar el recurso al pulmón y corazón mecánicos para intervenir a corazón activo,

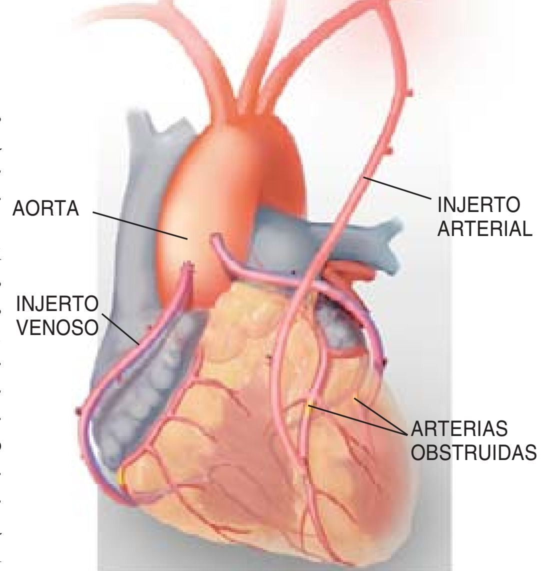
es decir, latiendo. Otros equipos han ensayado la cirugía cardíaca por endoscopia, operación que requiere sólo una incisión de escasos centímetros.

El dolor que oprime el tórax de Petit, Vázquez o Bejarano es consecuencia de la aterosclerosis o endurecimiento de las arterias. Con el paso del tiempo, el colesterol y otras substancias pueden acumularse en las paredes arteriales, estrechando poco a poco la luz de los vasos. La enfermedad progresa paulatinamente y, hacia la cincuentena, se empieza a notar dolor en el pecho porque el angostamiento coronario limita el flujo sanguíneo, que resulta insuficiente durante una actividad vigorosa.

Millones de personas en todo el mundo se han visto afectadas por esta enfermedad devastadora. Los factores genéticos favorecen la aterosclerosis, pero la dieta y el estilo de vida son también responsables. Nos ocuparemos aquí de la mejora de los tratamientos de las enfermedades coronarias, pero no podemos dejar de anteponer su prevención con una dieta adecuada, el ejercicio y el abandono del tabaco.

Una vez diagnosticada la aterosclerosis, pueden recomendarse fármacos u optar por la angioplastia, es decir, la inserción de un pequeño balón oblongo en la arteria taponada; al inflar el balón se estira la pared defectuosa y el vaso se dilata. El cardiólogo coloca también a veces una minúscula estructura metálica para mantener abierto el vaso. Pero si prevé que la arteria volverá a estrecharse al poco de la angioplastia, tendrá que practicar un puente entre las arterias coronarias para restaurar el flujo sanguíneo adecuado del corazón. Esa cirugía de derivación implica a menudo injertar de tres a cinco vasos en las arterias del corazón. En cada injerto, cuya realización necesita unos veinte minutos, los cirujanos efectúan una sutura entre el vaso donante y la arteria coronaria obstruida.

La máquina corazón-pulmón constituye una de las principales fuentes de complicaciones de la cirugía cardíaca. El médico conecta la máquina, por un lado, a la aurícula derecha del corazón (que recibe sangre venosa) y, por otro, a la aorta, que vehicula la sangre oxigenada. Luego, introduce una disolución cardiopléjica en la arteria coronaria, que detiene los latidos cardíacos. Por causa de ello, se desprenden a veces trozos de placas ateromatosas de la aorta, que si llegan al cerebro pueden provocar un accidente cerebrovascular. Además, la máquina corazón-pulmón perturba el sistema de defensas naturales del organismo, originando fiebre, lesiones orgánicas y hemorragias. Después de la intervención, el paciente requiere en ocasiones respiración asistida. Por último, cuando el corazón vuelve a latir muestra a menudo signos de función alterada (arritmias); el paciente puede sufrir bajada de presión arterial, disminución de flujo sanguíneo y merma en su producción de orina. En casos excepcionales, ha de sustituirse la máquina por una bomba mecánica para mantener una presión arterial aceptable.



2. EL INJERTO DE UN PUENTE entre las coronarias obliga habitualmente a colocar entre tres y cinco vasos sanguíneos sobre las arterias del tejido cardíaco de modo que el flujo de sangre a través de la derivación practicada salve los bloqueos. Los cirujanos utilizan injertos arteriales (arterias redirigidas desde la vecindad del corazón) o injertos venosos (segmentos de venas de las piernas).

Varios estudios nos dan una idea numérica de tales riesgos. La probabilidad de muerte subsiguiente a la derivación practicada aumenta con la edad. En los Estados Unidos, por ejemplo, salta de un 1,1 por ciento en enfermos de edades entre 20 y 50 años a un 7,2 por ciento entre 81 y 90 años. Uno de cada tres pacientes sufre al menos una complicación postoperatoria. De acuerdo con cierto informe de 1997, entre los pacientes de más de 65 años, un 4 por ciento falleció en el hospital, otro 4 por ciento fue enviado a un centro de convalecencia, y otro 10 por ciento recibió el alta después de al menos dos semanas en el hospital. Pérdida de memoria y atención, debilidad física y depresión impiden a menudo que los pacientes vuelvan a las actividades normales por lo menos durante dos o tres meses.

A lo largo de los últimos 15 años hemos venido investigando vías más eficaces para el tratamiento de las enfermedades coronarias y, en ese marco, hemos ingeniado un dispositivo mecánico que inmoviliza sólo la zona del vaso obstruido, no el corazón entero.

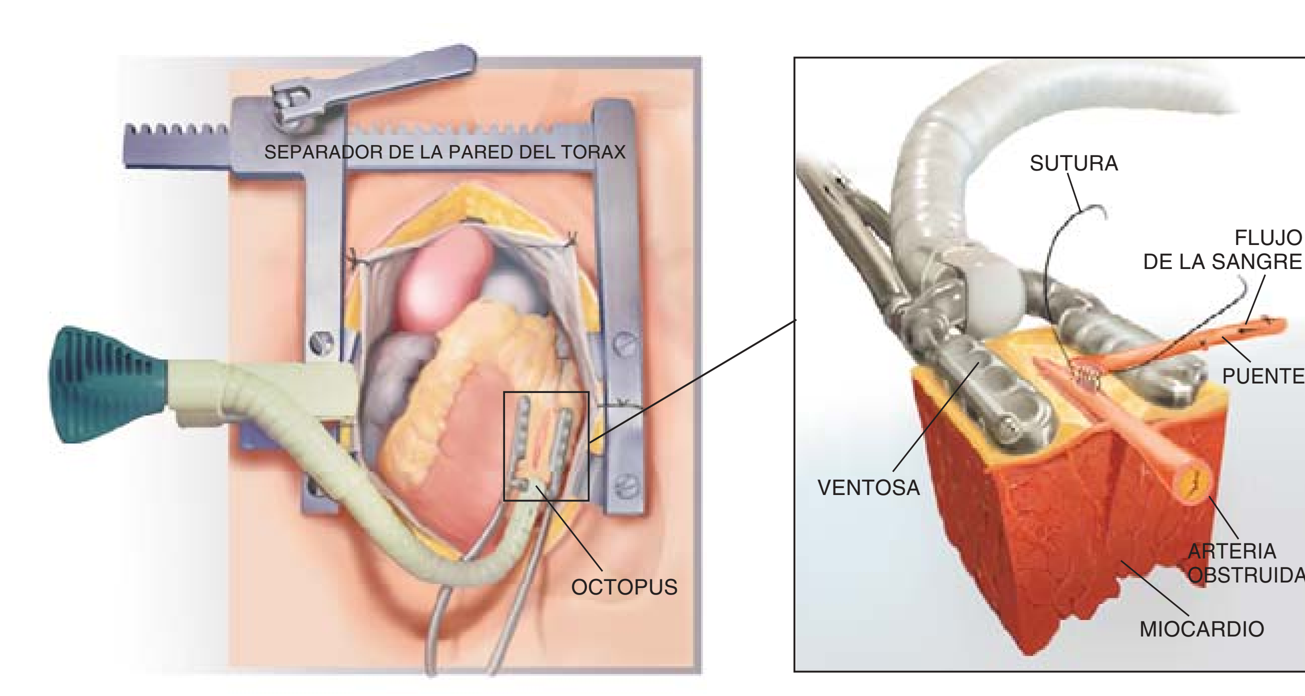
En marzo de 1993, se celebró un congreso en Palm Coast sobre la aplicación médica del láser. Intervino Richard Satava, médico militar en esa fecha, para explicar el prototipo de un robot, guiado a distancia por los cirujanos, para las operaciones de urgencia en los campos de batalla. La fotografía del prototipo me sugirió la posibilidad de intervenir a corazón activo, sin necesidad de un equipo ultrarrefinado.

3. MAQUINA CORAZON-PULMON para asegurar la circulación de sangre y oxígeno por el organismo. Las complicaciones potenciales resultantes del empleo de esta máquina comprenden el riesgo de ictus, fiebre, infección y hemorragias.



El “Pulpo”

En la primavera de 1994, con Erik Jansen, cardiocirujano del Instituto Cardiopulmonar de Utrecht, repetimos en cerdos una operación a corazón latiendo que habían propuesto, en los



4. EL *OCTOPUS*, ESTABILIZADOR DEL CORAZON, inmoviliza una zona de la superficie del corazón que sigue latiendo. Los cirujanos pueden suturar con precisión el injerto de derivación. El *Octopus*, inventado por el autor y sus colaboradores, fija, mediante succión, una región pequeña del corazón; cuando se tensa el tirador azul, el *Octopus* se ancla sobre el artefacto metálico que sirve para mantener abierta la pared de la cavidad pectoral (*izquierda*). Aunque el corazón sigue latiendo casi normalmente, el lugar del injerto (*derecha*) permanece inmóvil, lo que permite al cirujano suturar el puente a la arteria bloqueada.

años ochenta, Federico J. Benetti, del Centro de Cirugía Cardiovascular de Buenos Aires, y Enio Buffolo, de la Universidad Federal de São Paulo. Tanto Benetti como Buffolo habían realizado la intervención en humanos.

Ellos inmovilizaban una región pequeña de la superficie del corazón mediante puntos de sutura de estabilización practicados sobre el tejido adyacente al lugar de derivación y mediante la presión ejercida por una gran pinza quirúrgica sostenida manualmente. Al impedir que sólo una parte del corazón quede sin latir —unos pocos centímetros cuadrados— apenas obstaculizaban el bombeo del corazón. Pese a la elegancia del procedimiento, fueron contados los seguidores de Benetti y Buffolo.

Un día de mayo de 1994 en Utrecht, durante una intervención experimental en un cerdo, yo me encargaba de sostener la pinza. Pero fracasamos en nuestro intento de inmovilizar del todo la región del corazón donde queríamos realizar la derivación. Del fallo me vino la luz. ¿Por qué no sustituir los puntos de sutura y la mano humana por un dispositivo mecánico rígido? Escasas semanas después, Jansen utilizó con éxito un prototipo de estabilizador cardíaco construido por la empresa Rik Mansvelt Beck.

No tardó en incorporarse a nuestro grupo Paul Gründeman. Con él inventé el estabilizador cardíaco *Octopus* (“Pulpo”), un instrumento que puede inmovilizar cualquier área pequeña de la superficie de un corazón latiente. Se le dio ese nombre por las ventosas que fijan el instrumento en el corazón y en homenaje a “Octopussy”, cerdito de nuestro laboratorio (todos nuestros animales recibían algún nombre de los personajes de las películas de James Bond). En septiembre de 1995 utilizábamos por vez primera vez el *Octopus* en un paciente humano. A mediados del año 2000, más de 50.000 personas han sido intervenidas con el *Octopus* en todo el mundo. De los 400 operados en Utrecht, ninguno murió durante la intervención ni en los 30 días siguientes.

Otros investigadores han ideado sus propios dispositivos de estabilización mecánica; en su mayoría actúan por presión y fricción, y así semejan una pinza quirúrgica de gran tamaño que oprime el corazón. Los cardiocirujanos tienen ahora a su disposición hasta 13 tipos de estabilizadores mecánicos diferentes. Si en 1994 no llegaban al 0,1 por ciento las intervenciones realizadas sin la ayuda de la máquina corazón-pulmón, cinco años más tarde la cifra se elevó al 10 por ciento y, para el 2005, se superará el 50 por ciento. En los hospitales carentes de máquinas corazón-pulmón, pensemos en los del Tercer Mundo, esos sistemas permitirán una cirugía coronaria que se les ha venido negando.

Benetti dio, mientras tanto, un nuevo empuje al sistema de intervención a corazón activo. Redujo el tamaño de la incisión a ocho centímetros, entre las costillas del lado izquierdo del tórax, para pacientes que necesitaran sólo un injerto sobre la arteria coronaria principal en la cara frontal del corazón. Aunque este procedimiento sigue requiriendo que los cirujanos separen las costillas adyacentes, es con mucho menos traumatizante que el desgarro de la caja torácica entera.

Los cirujanos se han interesado por esos progresos, obviamente. En noviembre de 1994, durante un coloquio celebrado en Roma, Valavanur Subramanian, del Hospital Lenox Hill de Nueva York, proyectó una película de presentación de dicha técnica. La incisión restringida se difundió pronto por toda Europa. Desde que en septiembre de 1995 se celebró la primera conferencia internacional sobre cirugía de coronarias mínimamente invasiva, en Utrecht, la intervención a corazón activo se ha aplicado ya a varios millares de pacientes.

Sin embargo, esa técnica no reemplazará por completo a la cirugía

tradicional. Para muchos pacientes, la operación clásica seguirá siendo la mejor solución. Por ejemplo, cuando alguien necesita que se realice una derivación detrás del corazón (algo frecuente), la cirugía a corazón latiente resulta a menudo delicada, pues el médico ha de sacarlo parcialmente fuera del tórax. Esta maniobra, cuando se realiza a corazón activo, deforma el órgano, reduce la cantidad de sangre que puede bombear y se produce una caída peligrosa de la presión sanguínea.

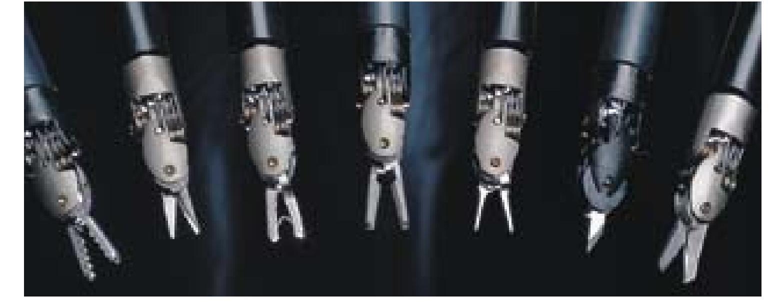
Con los años se han ido descubriendo medidas simples que evitan semejantes riesgos. Gründeman ha demostrado que una inclinación de la mesa de operaciones entre 15 y 20 grados, de manera que la cabeza quede más baja que el tórax, previene una caída excesiva de la presión arterial. En el Hospital Real Portugués de Recife, Ricardo Lima utiliza el pericardio (membrana envolvente del corazón) para levantar el órgano parcialmente fuera del tórax y acceder a la parte posterior sin comprometer la presión sanguínea.

A mediados del año 2000, eran ya casi 200.000 los pacientes que se habían sometido a una derivación coronaria a corazón activo, con ayuda de un estabilizador mecánico. La primera ronda de estudios de seguimiento indica que estos pacientes sufrieron menos complicaciones durante la intervención quirúrgica, requirieron menos transfusiones de sangre, permanecieron en un ventilador artificial o en la unidad de cuidados intensivos menos tiempo, y abandonaron el hospital y volvieron a las actividades normales antes que los intervenidos según la cirugía cardíaca tradicional. Además, disponemos ya de informes preliminares sobre procedimientos de derivación única que muestran que los gastos se reducen a menos de un tercio. Se trata, empero, de muestreos realizados con pacientes seleccionados. Por tanto, esos resultados pueden no representar el universo de los intervenidos. En Holanda los ensayos clínicos de *Octopus* deben estar terminados hacia finales del año 2001.

CORNELIUS BORST, formado en la Universidad de Amsterdam, enseña cardiología en la de Utrecht. Entre otros intereses suyos se encuentran el estudio de los mecanismos del estrechamiento aterosclerótico de las coronarias y el reestrechamiento que sigue a la angioplastia.

Cirugía de tamaños reducidos

La ventaja principal de la cirugía a corazón activo radica en la independencia de la máquina corazón-pulmón. En la cirugía abdominal, los médicos pueden hacer intervenciones completas, como extirpar la vesícula biliar, a través de pequeñas incisiones, de sólo escasos centímetros, gracias a la cirugía endoscópica. En esta técnica, el cirujano inserta un tubo rígido conectado a una minicámara de vídeo (el endoscopio) a través de una incisión y los instrumentos quirúrgicos requeridos a través de dos incisiones más; la información que da el endoscopio guía los movimientos del cirujano. ¿Por qué no podríamos, pues, intervenir el corazón por medios mínimamente invasivos, a través de aperturas entre las costillas de sólo un centímetro?





5. SEGUIMIENTO VISUAL, por parte del cirujano, de la intervención realizada por un robot (*abajo*). Se aprecian dos instrumentos diminutos usados para efectuar la derivación. Se muestran arriba modelos adicionales. Los cirujanos pueden ver el interior de la cavidad torácica gracias a una cámara cuyas lentes se insertan a través de una pequeña incisión intercostal; los movimientos de las manos del cirujano sobre la consola de un ordenador se traducen en movimientos precisos de los instrumentos quirúrgicos.

En la Universidad de Stanford se idearon procedimientos de cirugía cardíaca por endoscopia en un tórax cerrado y corazón detenido, mientras el paciente permanecía conectado a una máquina corazón-pulmón. La iniciativa de Stanford dio origen a la compañía Heartport.

Para conectar un paciente de Heartport a la máquina corazón-pulmón, y suspender la actividad cardíaca sin abrir el tórax, hacen falta varios tubos y catéteres que han de manipularse desde la ingle. Pero no todos los pacientes soportan igual el procedimiento. Además, las suturas para fijar el puente son muy exigentes. Debido a las limitaciones de los instrumentos quirúrgicos endoscópicos habituales y al estrecho espacio de maniobra en el tórax cerrado ha habido que abandonar estos intentos iniciales de intervención endoscópica después de las tres primeras tentativas. Según parece, deben efectuarse incisiones más amplias (de seis a nueve centímetros) para obtener suturas fiables de los injertos a las arterias coronarias. Hacia mediados del año 2000, se habían tratado ya de esta manera más de 6000 pacientes coronarios.

¿Verán los cirujanos el día en que puedan operar a corazón activo con la caja torácica cerrada? Para compensar las limitaciones de la endoscopia clásica, los investigadores comienzan a ensayar con robots. En estos sistemas, los instrumentos quirúrgicos no están controlados direc-



6. LOS CONTROLES REMOTOS que se usan durante la cirugía para colocar un puente requieren que el cirujano (*izquierda*) se siente a corta distancia del enfermo. Un monitor (*arriba a la izquierda*) permite que el resto del equipo quirúrgico siga la marcha de la intervención.

tamente por las manos del cirujano, sino por un robot guiado a distancia. Los cirujanos ven el interior del tórax en tres dimensiones; con los movimientos de sus manos en la consola del ordenador dirigen los instrumentos quirúrgicos dentro del tórax. El ordenador filtra automáticamente los movimientos para eliminar el temblor natural y aumentar así la precisión.

Los primeros cirujanos que recurrieron a los robots en la intervención coronaria con tórax cerrado (aunque con máquina corazón-pulmón) fueron Friedrich Mohr, Volkmar Falk y Anno Diegler, del Centro de Cardiología de la Universidad de Leipzig, y Alain Carpentier y Didier Loulmet, del Hospital Broussais de París. En 1998, en un intento renovado de aplicar el sistema original de Heartport a corazón parado, combinaron el método de Heartport con el sistema da Vinci de cirugía endoscópica por robot.

En septiembre de 1999, Douglas Boyd, de la Universidad de Ontario, realizó la primera operación asistida por ordenador a corazón activo y tórax cerrado. Un día le llevó. A mediados del año 2000, sin embargo, los cirujanos de Munich, Leipzig, Dresde y Londres habían reducido el tiempo de quirófano entre tres y cinco horas en 25 casos de intervenciones exitosas de derivaciones con tórax cerrado y corazón activo.

El robot se va imponiendo en las salas de operaciones. A medida que se depure la técnica, los residentes en cirugía podrán ensayar las operaciones coronarias por endoscopia a la manera en que los pilotos se ejercitan en simuladores de vuelo. Otras innovaciones podrían facilitar, además, el tratamiento quirúrgico de las cardiopatías. Hay en fase de desarrollo un sistema de presión que permitirá al cirujano colocar un puente rápidamente y sin suturas.

La intervención de derivación coronaria terminará quizás en el baúl de los recuerdos. Mientras llega ese día, la prevención de la enfermedad coronaria y el perfeccionamiento constante de las técnicas deberán seguir siendo prioridad médica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MINIMALLY INVASIVE CORONARY ARTERY BYPASS GRAFTING: AN EXPERIMENTAL PERSPECTIVE. Cornelius Borst y Paul F. Gründeman en *Circulation*, vol. 99, n.º 11, págs. 1400-1403; 23 de marzo de 1999.

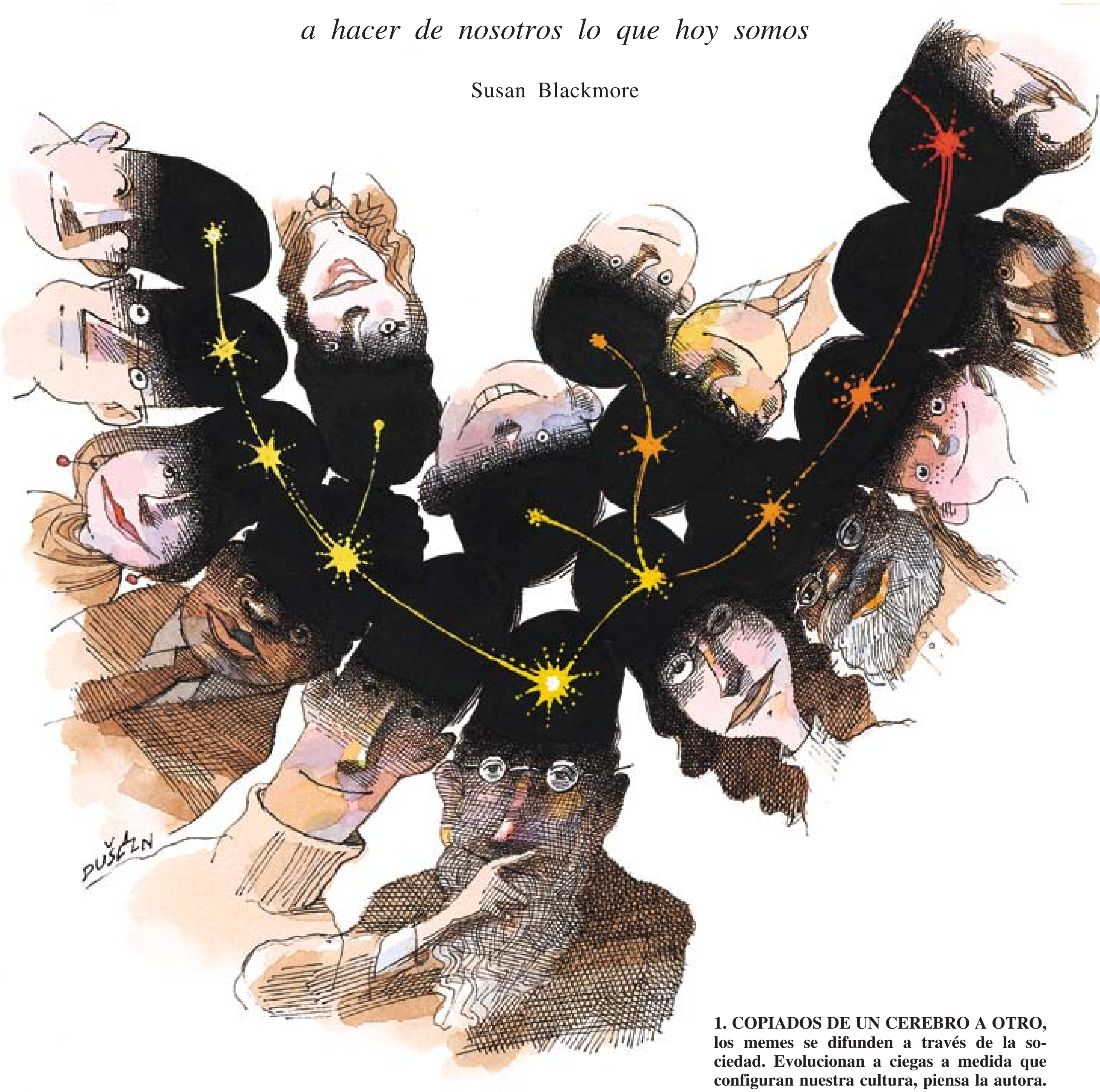
MINIMALLY INVASIVE CARDIAC SURGERY. Dirigido por Robbin G. Cohen y cols. Quality Medical Publishing, 1999.

MINIMAL ACCESS CARDIOTHORACIC SURGERY. Dirigido por Anthony P. C. Yim y cols. W. B. Saunders Company, 2000.

EL PODER DE LOS MEMES

Las conductas e ideas copiadas por imitación de una persona a otra —los memes— podrían haber obligado a los genes a hacer de nosotros lo que hoy somos

Susan Blackmore



1. COPIADOS DE UN CEREBRO A OTRO, los memes se difunden a través de la sociedad. Evolucionan a ciegas a medida que configuran nuestra cultura, piensa la autora.

Las personas dedican mucho tiempo a copiar y transmitir unas entidades denominadas memes. Un meme es una idea, un comportamiento, un estilo o una manera de ser que se propaga de un individuo a otro en el seno de una cultura. Cuando las personas se saludan dándose la mano, cantan “Cumpleaños feliz” o depositan su voto en las urnas, están difundiendo memes.

En eso no hay discusión. Pero la polémica se ha desatado a raíz de la tesis de la psicóloga **Susan Blackmore.** Detallada a lo largo de este artículo, propone que la misteriosa capacidad de los humanos para imitar, y transmitir, pues, los memes, es lo que nos distingue de las demás especies. Los memes, aduce, han sido y siguen siendo un factor poderoso en la conformación de nuestra evolución cultural y biológica. Intervienen en el debate suscitado **Lee Alan Dugatkin**, ecólogo, **Robert Boyd**, antropólogo, **Peter J. Richerson**, genético de poblaciones, y **Henry Plotkin**, psicólogo.

El hombre es un animal extraño. La teoría evolucionista explica de un modo brillante los rasgos que compartimos con otros, desde el código genético que dirige la construcción del cuerpo hasta los mecanismos de funcionamiento de músculos y neuronas. Pero nuestra especie se singulariza en infinitos aspectos. Poseemos un cerebro de tamaño excepcional, tenemos un lenguaje gramatical, componemos sinfonías, conducimos coches, comemos fideos con tenedor y nos interrogamos sobre el origen del universo.

El problema estriba en que tales aptitudes parecen desproporcionadas para nuestras necesidades, las que hemos de satisfacer para sobrevivir. Como señalaba Steven Pinker, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en *How the mind works*, “por lo que a la relación de causa a efecto concierne en el dominio de la biología, la música no sirve para nada”. Podríamos decir lo mismo del arte, del ajedrez o de la matemática pura.

La teoría evolucionista clásica, la darwinista, que se ocupa de los caracteres hereditarios de los organismos, no puede aportar una justificación directa de tales dones. Dicha teoría, expresada en términos actuales, sostiene que los genes controlan los caracteres de los organismos. En el transcurso de las generaciones, los genes que otorgan a sus portadores una ventajosa supervivencia y favorecen una descendencia numerosa (heredera de tales genes), tienden a proliferar a expensas de otros. Los genes compiten, pues, entre sí; los que se impongan, pasarán de una generación a la siguiente.

Muy contados biólogos rechazarían la teoría darwinista. Pero no explica la razón por la cual los humanos han invertido tantos recursos en aptitudes superfluas para la tarea biológica principal, es decir, para la propagación de los genes. ¿Qué otra teoría explicaría tales comportamientos?

En los memes, defiendo aquí, se halla la respuesta. Los memes son relatos, canciones, hábitos, técnicas, inventos y conductas que los individuos adquieren por imitación. La teoría de la evolución explica la naturaleza humana siempre y cuando integre la transmisión de los memes, además de la de los genes.

Por sugestivo que sea considerar simples “ideas” los memes, resulta más apropiado entenderlos como una vía de información. (Los genes son también información: instrucciones escritas en el ADN para sintetizar proteínas.) Así, el meme de las ocho primeras notas de la melodía de *La Verbena de la Paloma* puede grabarse no sólo en las neuronas de una persona (que las reconocerá en cuanto las oiga), sino también en la banda magnética de una videocasete o en los signos escritos en una partitura.

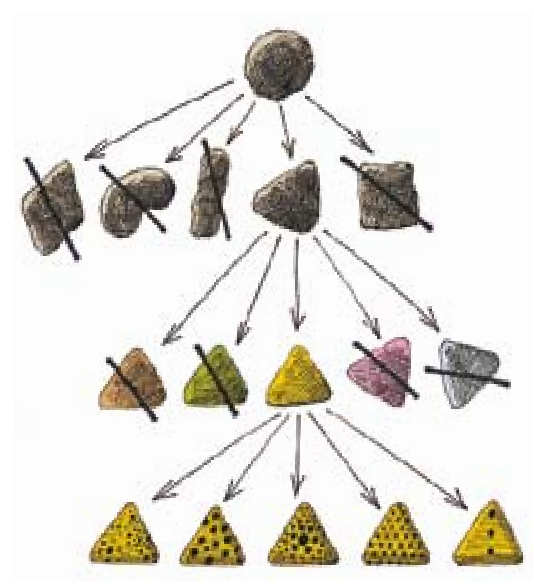
El nacimiento de los memes

Aunque el concepto de meme se gestó hace unos 25 años, no se advirtió su poderosa virtualidad en la evolución humana hasta ayer mismo. Richard Dawkins, de la Universidad de Oxford, acuñó el término en 1976 en su libro *El gen egoísta*, donde describía el principio básico de la teoría darwinista en función de tres procesos generales: la replicación de una información, las variaciones surgidas y la selección de unas variantes frente a otras, eso es la evolución. Tras sucesivas iteraciones del ciclo, la población de copias supervivientes irá adquiriendo de forma gradual nuevas propiedades que la habilitan para triunfar en el proceso de competición por la reproducción. Aunque se trata de un ciclo carente de intencionalidad, produce orden estructural a partir del caos.

Dawkins llamó “replicador” a la información copiada y señaló que el más conocido era el gen. Pero se proponía resaltar que la evolución podía basarse en cualquier replicador y así, a modo de ejemplo, inventó la idea de meme. La copia de memes entre personas es imperfecta, como lo es en la replicación de genes de padres en hijos. Podríamos adornar un relato, olvidar una palabra de una canción, adaptar una técnica anticuada o crear una nueva teoría a partir de viejas ideas. De todas estas variaciones, unas se copiarán muchas veces, en tanto que otras desaparecerán. Los memes son, pues, auténticos replicadores, dotados de las tres propiedades necesarias para engendrar un nuevo proceso de evolución darwinista: replicación, variación y selección.

Dawkins cuenta que abrigaba intenciones más modestas para su vocablo: evitar que sus lectores pensaran que “el gen es el principio y final de la evolución, la unidad fundamental de la selección”, pero su idea resultó pura dinamita. Si los memes son replicadores, entonces competirán, igual que los genes, para ser copiados *por mor de sí mismos*. Afirmación que contradice la hipótesis,

defendida por la mayoría de los psicólogos evolucionistas, según la cual cumple a la cultura humana ayudar a la supervivencia de los genes. El fundador de la sociobiología E. O. Wilson pronunció la famosa frase de que los genes metían en cintura a la cultura. La cultura podría evolucionar transitoriamente en determinada dirección refractaria a la difusión de los genes, mas, a la larga, regresaría a su sitio impulsada por la selección natural basada en los genes, lo mismo que el dueño da correa a su perro. Bajo este punto de vista, los memes serían esclavos de los genes; éstos construyen los cerebros que copian los memes, los cuales sólo prosperarían a través de la ayuda brindada a la proliferación de los genes. Pero si Dawkins anda en lo cierto, es decir, si los memes son replicadores, entonces servirán a sus egoístas intereses, replicándose siempre que puedan. Esculpirán nuestra mente y cultura, cualquiera que sea su efecto sobre los genes.



2. EL DARWINISMO UNIVERSAL explica la evolución con un sistema de replicadores que presentan variación, selección y herencia. La variación surge de la recombinación y de la copia imperfecta. Se produce la selección cuando no hay recursos para todos los variantes. La herencia asegura la transmisión de las cualidades deseables. Desde este algoritmo ciego se arriba hasta entidades sumamente elaboradas.

El ejemplo de los memes "víricos" ilustra ese fenómeno. Las cadenas epistolares, enviadas por correo tradicional y electrónico, contienen retazos de información escrita, que incluye una orden de "cópiame" acompañada de amenazas (si rompes la cadena, la mala suerte caerá sobre ti) o promesas (recibirás dinero y podrás ayudar a los amigos). No importa que amenazas y promesas sean vacuas y el esfuerzo de copia sea empeño baldío. Estos memes tienen una estructura interna que asegura su propia difusión.

Para Dawkins, ocurre así con las grandes religiones del mundo. Entre miríadas de cultos que han aparecido a lo largo de la historia, sólo unos pocos han logrado subsistir gracias, en su opinión, a las instrucciones del tipo "cópiame", acompañadas de promesas y amenazas. Se amenaza a los réprobos con la muerte o la condenación eterna y se promete a los fieles la bendición perdurable. El coste es una parte de los ingresos, una vida dedicada a propagar la palabra o recursos dedicados a la construcción de magníficas mezquitas y catedrales que promoverán los memes. A veces los memes podrían impedir la propagación de los genes, con la imposición, por ejemplo, del celibato.

Por supuesto, no todos los cultos (ni las cartas en cadena) se propagan con el mismo éxito. Algunas promesas y amenazas son más eficaces, o virulentas, que otras. Todas compiten por captar la atención de los limitados recursos de la atención humana, frente a la experiencia y el escepticismo (que suponen una especie de sistema inmunitario en la metáfora del virus).

Las religiones no son, por supuesto, enteramente víricas; confortan e infunden el sentido de pertenencia a un grupo. En cualquier caso, no todos los memes son víricos. La mayoría conforma el material clave de nuestras vidas, incluidos el lenguaje, el sistema político, las instituciones financieras, la educación, la ciencia y la técnica. Todo esto son memes (o grupos de memes), que pasan por imitación de un individuo a otro y pugnan por subsistir en el limitado espacio de la memoria y la cultura.

El pensamiento memético alumbra una nueva visión del mundo. En su óptica, cada ser humano es una máquina fabricante de memes, un vehículo de propagación, una oportunidad de replicación y unos recursos por los que competir. No somos ni los esclavos de nuestros genes, ni agentes libres y racionales que crean cultura, arte, ciencia y técnica para nuestro propio disfrute. Somos parte de un vasto proceso evolutivo en el que los memes son los replicadores evolutivos y nosotros, las máquinas de memes.

Esta nueva visión es notable e inquietante. Llama la atención que una simple teoría abarque cultura, creatividad de la mente y evolución biológica. Inquieta que pretenda reducir retazos de nuestra humanidad, acti-

MEMES Y GRUPOS MEMETICOS

Anécdotas, leyendas urbanas, mitos	Creer en ovnis, fantasmas, Santa Claus
Vestidos, peinados, adornos corporales	Frases racistas, chistes sexistas
Cocina, fumar cigarrillos	Religiones
Aplaudir, brindar	Inventos, teorías, ciencia
Lenguaje, acentos, lugares comunes	Sistemas judiciales, democracia
Canciones, música, danzas	La historia de la magdalena de Proust

SIN MEMES

Experiencias subjetivas, emociones complejas, percepciones sensoriales	Respuestas condicionadas: temor ante el sonido del torno del dentista
Comer, respirar, relaciones sexuales	Mapas cognitivos: conocimiento del trazado del propio barrio
Conductas innatas aunque contagiosas: bostezar, toser, reír	Asociaciones con sonidos y olores

Nota: Muchas conductas humanas son complicadas mezclas de elementos innatos, aprendidos o imitados; por ejemplo, ir en bicicleta.

CONTRAPUNTO

Los animales también imitan

Lee Alan Dugatkin

Estoy de acuerdo con el empeño puesto por Susan Blackmore en infectar la mente de la gente con el meme encerrado en la afirmación "la imitación es importante". Pero discrepo de su idea de que los memes —las entidades imitadas— condicionen sólo la evolución del comportamiento humano. En el reino animal, desde los peces hasta los primates, se copian unos a otros a la hora de decidir qué comer o con quién aparearse. Los memes influyen en los hábitos de muchos animales con la misma razón que en el comportamiento humano. La observación atenta de los mirlos nos descubre que los memes no son patrimonio único del hombre, ni siquiera del chimpancé y otros primates. Pero antes habrá que aclarar qué entender por *imitación*.

Los psicólogos debaten sobre el significado de esa palabra. Abundan los escritos donde se divide el significado en un rosario de subcategorías. Pero en su relación con los memes, adoptemos de entrada la definición dada por Blackmore en su libro *The Meme Machine*. Ofrece allí dos perspectivas diferentes. La definición más restringida establece que la imitación abarca tres comportamientos complejos: decidir qué imitar, pasar del estatuto de observador al de imitador y producir una acción corporal adecuada. Bajo estos criterios tan estrictos, la imitación no se daría en el mundo animal. Resulta extraordinariamente difícil averiguar si los animales pueden transformar un punto de vista en otro; además, ¿cómo saber qué deciden imitar?

Blackmore aduce otra definición mucho más lata, que ejemplifica en la transmisión de historias. "No es que imitemos a quien nos lo ha contado con sus gestos y frases, sino que copiamos lo esencial de la historia que, a continuación, alguien copia de nosotros", afirma. Probablemente existen cientos de ejemplos de imitación animal que encajan en esta definición, y no es una excepción la manera en que los pájaros aprenden a reaccionar ante sus depredadores.

En 1978, Eberhard Curio y su grupo, de la Universidad de Bochum, montaron un escenario donde se desarrollaba la acción siguiente: un mirlo podía ver a otro que batía alas y agitaba la cola ante la cercanía de un depredador. El segundo pájaro respondía a un verdadero depredador, un pequeño búho, pero el primer mirlo no podía ver al búho, celado por una serie de compartimentos. Mediante una serie de estratégicas manipulaciones, se obligó al observador a que pensara que su compañero estaba reaccionando ante la presencia de un ruidoso frailecillo, que, por lo común, no constituye ninguna amenaza para los mirlos. A continuación, los investigadores situaron al mirlo observador frente a un frailecillo y también reaccionó con un movimiento agitado de plumas y cola. Curio y sus colegas descubrieron que el falso mensaje —"el frailecillo es un depredador"— podía difundirse en cadena hasta un número de seis mirlos.

Pero el simple hecho de que algo se copie no lo convierte en un meme. Blackmore sostiene que un mensaje debe cumplir tres requisitos más: debe copiarse con fidelidad, han de realizarse muchas copias y éstas tienen que perdurar largo tiempo. El mensaje "el frailecillo es un depredador" se transmitió con exactitud y las copias del mensaje pasaron de un individuo a otro. Aunque es imposible conocer la longevidad de este meme fundado en experimentos de laboratorio, en principio no parece haber motivo que impida, una vez asentado, su propagación definitiva en poblaciones de campo.



LOS MIRLOS aprenden a reconocer a los depredadores mediante la observación de qué es lo que les hace temblar a sus compañeros. Por ese motivo, recelan a veces de otros que no les suponen ninguna amenaza.

En mi trabajo habitual como ecólogo del comportamiento, me he encontrado con docenas de ejemplos sobre el comportamiento animal que encajan en la definición de meme, y no me extrañaría que su número total fuera ingente. Los memes podrían revelarse más antiguos y fundamentales para la evolución biológica que lo alegado por Blackmore. Y quizá la diferencia entre memes animales y humanos sea más cuantitativa que cualitativa. Los partidarios de la teoría memética podrían defender la idea de que los memes animales son reales y con ello reivindicar su fuerza de importancia universal en la evolución. Pero si los memes no nos diferencian de los animales, como Blackmore da a entender, la teoría pierde fuerza: resultaría incapaz de explicar el carácter exclusivamente humano de la cultura.

LEE ALAN DUGATKIN es profesor de biología de la Universidad de Louisville. Ha estudiado el proceso de imitación en animales, tema abordado en su libro The Imitation Factor: Evolution Beyond the Gene*, que aparecerá en enero.*



3. EL DESARROLLO DE LA CULTURA partió probablemente en el momento en que nuestros antepasados homínidos aprendieron a imitarse entre sí (*izquierda*). Los individuos mejor preparados para imitar las nuevas técnicas de supervivencia —el dominio del fuego, por ejemplo— prosperaron y primaron a los genes que les dotaron de mayor capacidad mimética. Más adelante, cuando la imitación resultó ventajosa en términos de selección (*centro*), los genes debieron desarrollar estrategias para asegurar la imitación de las conductas más valiosas. Con tácticas del estilo "imitar a los mejores imitadores" se lograrían copias fieles de nuevas técnicas de superviven-

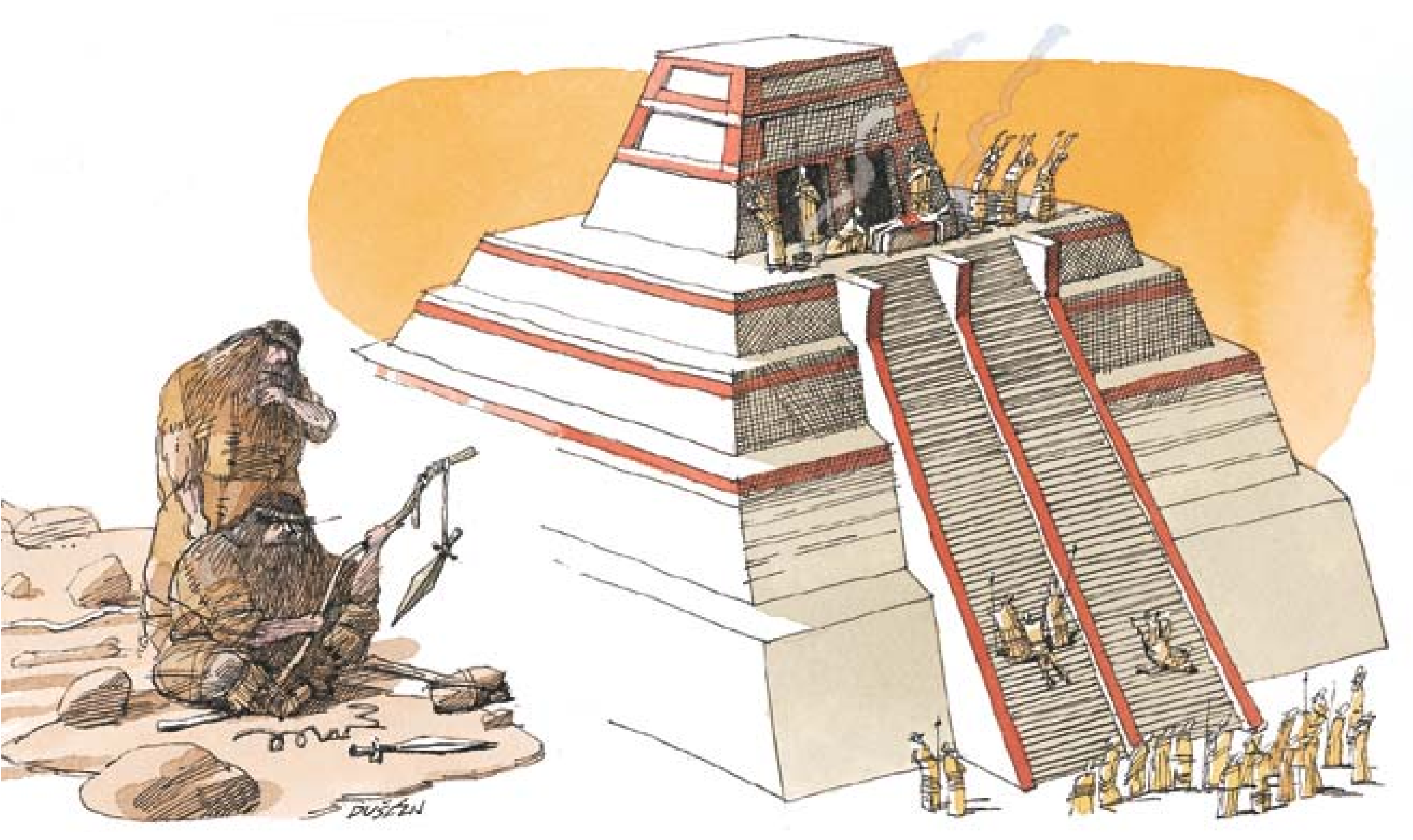
vidad y vida intelectual a un fenómeno carente de intención. Pero, ¿está fundada la memética? ¿Pueden los memes ayudar a entendernos? ¿Pueden someterse a contrastación empírica? ¿Desempeñan alguna función científica? Si nada de ello hubiera la memética sería un camelo.

Estimo que la idea del meme, en cuanto replicador, es el concepto que venía faltando en las teorías sobre la evolución humana. La memética explica la singularidad de nuestra especie y la aparición de culturas y sociedades avanzadas. Somos únicos porque, sólo nosotros, en el pasado, adquirimos la capacidad de una imitación generalizada. Esa aptitud creó nuevos replicadores, los memes, que se propagaron utilizándonos como máquinas copiadoras, de la misma manera que los genes usan los mecanismos replicadores del interior celular. En adelante, evolucionaríamos bajo la acción de dos replicadores, los genes y los memes. En eso nos distinguimos de los millones de especies que pueblan el planeta.

Influencia de los memes sobre el cerebro

Tal evolución particular nos dotó de un cerebro poderoso, de un lenguaje y de nuestro "excedente" de aptitudes. La memética resuelve el tamaño singular del cerebro humano, que le viene dado por los genes: tres veces mayor, con relación al peso corporal, que el cerebro de nuestros parientes próximos, los primates. Costoso en su formación y mantenimiento, muchas madres y bebés mueren en el parto por complicaciones derivadas de la magnitud de la cabeza. ¿Por qué ha permitido la evolución que el cerebro se desarrollara tanto? Las teorías tradicionales lo atribuyen a la ventaja genética que redunda en la mejora de las habilidades para la caza y el forrajeo o en la capacidad de sustentar grupos cooperativos mayores, que redoblan las posibilidades de supervivencia individual. La memética da una explicación totalmente diferente.

La transición crítica de los homínidos fue, según esa teoría, la aparición de la imitación, surgida quizás hace dos millones y medio de años, antes del descubrimiento de los instrumentos de piedra y del crecimiento del cerebro. La verdadera imitación consiste en copiar un comportamiento o una habilidad nuevos de otro animal. Es una operación difícil que requiere inteligencia notable, insólita en el reino animal. Aunque muchas aves reproducen cantos y las ballenas y los delfines imitan sonidos y acciones, la mayoría de las especies son incapaces de ello. A menudo, la "imitación" animal, ejemplificada en el aprendizaje de respuesta al ataque de un nuevo depredador, estriba lisa y llanamente en una conducta innata. La propia imitación de los chimpancés se limita a una pequeña serie de conductas, como los métodos para cazar termitas. Por contra, la imitación generalizada de cualquier actividad observada —que los humanos realizan con absoluta naturalidad— es arte mucho más difícil y, por ende, más valioso, con el que el imitador se beneficia del aprendizaje y del in-



cia, así como de conductas carentes de interés especial, como la ornamentación y engalanamiento. Los buenos imitadores subirían en la escala social, seducirían y tendrían mayor descendencia, induciendo ulteriormente a los genes a desarrollar cerebros mayores, capacitados para elaborar procesos de mímesis. La imitación se convertiría en parte intrínseca de la naturaleza humana. Los memes, en permanente evolución, crearían de un modo gradual sistemas culturales acabados (*derecha*), construirían monumentos y realizarían sacrificios humanos sin beneficio genético, aunque propicios para la transmisión de los memes asociados.

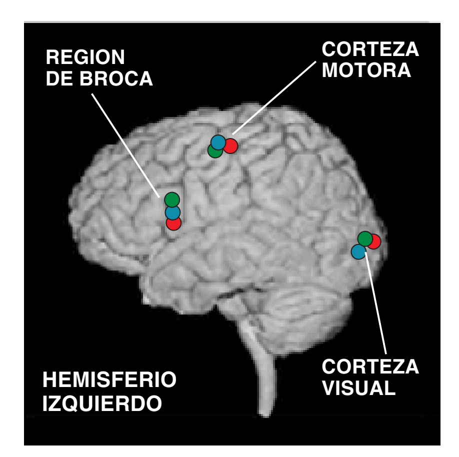
genio de otro. En experimentos llevados a cabo en 1995 en el Centro Regional de Investigación de Primates de Yerkes, cuando se les planteaban los mismos problemas a orangutanes y a niños, sólo los humanos recurrían a la imitación para resolverlos.

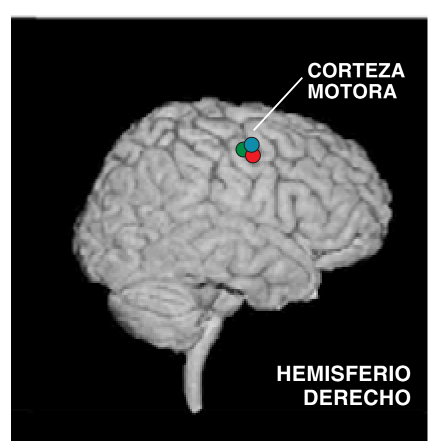
Nuestros antepasados remotos imitaban las técnicas nuevas de encender el fuego, cazar, transportar y cocinar alimentos. Conforme se fueron difundiendo estos primeros memes, la capacidad para adquirirlos cobró importancia creciente de cara a la supervivencia. En breve, las personas con mejores dotes para la imitación prosperaron y los genes que les concedieron los mayores cerebros necesarios para ello se difundieron en el acervo génico. A partir de ahí, todos mejoraron en sus aptitudes miméticas, intensificando la presión por un aumento del cerebro en una suerte de carrera de armamentos cerebral.

Una vez comenzaron todos a imitar, se abrió camino el segundo replicador cambiando para siempre el curso de la evolución humana. Los memes empezaron a tomar el control. Además de aprender a encender el fuego y otras aptitudes útiles, se copiaron habilidades menos prácticas, como el adorno corporal o las casi gratuitas danzas de la lluvia, tan inútiles cuán dispendiosas de energía. Los genes se encontraron con el problema de asegurar que sus portadores copiaran sólo los comportamientos útiles. Los memes recién surgidos pueden propagarse por imitación a través de la población en una sola generación, a una velocidad, pues, muy superior a la tasa de evolución genética. Para cuando los genes podían desarrollar una bien tramada predilección por encender el fuego y una aversión hacia la ejecución de danzas de la lluvia, pudieron aparecer y desaparecer novedades completamente diferentes. Los genes pueden desarrollar sólo amplias estrategias a largo plazo para conseguir que sus portadores sean más exigentes en los hechos a imitar.

Los genes parecen haber conducido a los individuos a copiar sólo a los mejores imitadores, personas que poseyeran la versión más adecuada de los memes útiles. (La expresión "mejores imitadores" se sustituiría ahora por "marcadores de tendencias".) Además de su bagaje útil para la supervivencia, los mejores imitadores adquirirían un mayor rango social, multiplicando sus oportunidades de supervivencia y ayudando a difundir los genes responsables de su talento imitador, es decir, los genes que dieron lugar a sus grandes cerebros especializados en una imitación atenta.

Los genes habrían fomentado las preferencias innatas de las personas para elegir el objeto a imitar, pero la respuesta genética, que necesita de varias generaciones para aparecer, siempre iría muy por detrás de los avances meméticos. Al proceso a través del cual los memes controlan la selección genética lo llamo "guía memética": los memes compiten entre sí y evolucionan con rapidez en una dirección, en tanto que los genes deben responder mejorando la imitación selectiva, verbigracia,





4. POR TOMOGRAFIA se determinará si el cerebro humano ha evolucionado hacia la imitación y difusión de los memes. En estos mapas se ha cartografiado la actividad nerviosa asociada a un movimiento específico de la mano. Las mismas zonas revelan si el sujeto actuaba por voluntad propia (*en rojo*), por mera observación (*en azul*) o por imitación de otra persona (*en verde*). La imitación producía la actividad más intensa. Los resultados sugieren que la región de Broca controla un "sistema neuronal especular" que ha evolucionado en el sentido de imitar las acciones. Los monos poseen, sin embargo, un sistema similar.

aumentando el volumen encefálico y su potencia. De este modo, los memes triunfantes empezarían a decidir qué genes les serían favorables. Los memes llevarían las riendas.

En un postrero viraje, se apostaría por emparejar los imitadores mejor dotados, pues se trataría de los que poseyeran las bazas óptimas para la supervivencia. Mediante este efecto, la selección sexual, guiada por los memes, contribuiría al aumento de talla del cerebro. Al escoger al mejor imitador como compañero, las mujeres difundirían los genes necesarios para copiar los rituales religiosos, los vestidos llenos de colorido, las canciones, los bailes, la pintura, etc. Por esa vía, el legado de la evolución memética del pasado se integraría en nuestra estructura cerebral, para convertirnos en personas con criterios musicales, artísticos o religiosos. Nuestros grandes cerebros son ingenios de imitación selectiva construidos por y para los memes lo mismo que para los genes.

SUSAN BLACKMORE, profesora de la Universidad de Bristol, se infectó con el virus de los memes en 1995 a través de la lectura de *Darwin's Dangeorous Idea* de Daniel Dennett y de un ensayo sobre los memes y la conciencia realizado por uno de sus doctorandos. El virus arraigó y Blackmore dedicó muchos de sus recursos generadores de memes al estudio y difusión de la idea.

El origen del lenguaje

El lenguaje pudo haber sido otra exquisita creación del mismo proceso de coevolución entre el meme y el gen. Las disputas relativas al origen y función del lenguaje adquirieron tal acritud, que, en 1866, la Sociedad Lingüística de París decidió dejar de examinar toda hipótesis sobre el asunto. Ni siquiera hoy existe acuerdo, si bien las teorías que gozan de mayor favor apelan a la ventaja genética. Robin Dunbar, de la Universidad de Liverpool, sostiene que el lenguaje es un sustituto del mutuo acicalamiento en el mantenimiento cohesionado de grupos sociales. Terrence Deacon, de la Universidad de Boston, opina que el lenguaje hizo posible la comunicación simbólica, que, a su vez, permitió mejorar la destreza cazadora, reforzó los lazos sociales y facilitó la defensa en grupo.

La teoría de la guía memética justifica el lenguaje por la ventaja que otorga a la supervivencia de los memes. Para comprender la razón de ello, hemos de preguntarnos qué tipo de memes sobrevivirían mejor y se difundirían en el acervo emergente de memes en los comienzos de la historia humana. Para cualquier replicador, la respuesta general serían los memes dotados de fecundidad, fidelidad y longevidad muy altas, vale decir, los memes que obtienen muchas copias precisas y perdurables de sí mismos.

Los sonidos son más fértiles que los gestos, en particular los de tipo "¡oiga!" o "¡mira!". Cualquiera que se halle en el campo de audición, mire o no al profiriente, se girará. La fidelidad de los memes hablados es mayor para los que están formados por unidades discretas de sonidos (fonemas) y divididos en palabras; se trata de una suerte de digitalización que reduce los errores de copia. A medida que las distintas acciones y vocalizaciones fueron compitiendo por asentarse en el acervo memético, las palabras prosperarían y desplazarían de la comunicación a los memes peor adaptados. Luego, encadenando palabras en órdenes diferentes, por adición de prefijos e inflexiones, se crearían nichos fértiles para nuevos memes hablados más complejos. En suma, los sonidos replicables de alta calidad arrasaron a los más pobres.

Al observar el efecto de este proceso sobre los genes, vemos que, una vez más, los mejores imitadores (los individuos que se expresaran con mayor claridad) adquirirían un estatuto superior, se aparearían con las mejores parejas y tendrían mayor descendencia. En consecuencia, los genes que determinaran capacidad de imitar los sonidos más inteligibles y reproducibles aumentarían en el acervo génico. En mi opinión, a través de este proceso los sonidos vencedores —la base del lenguaje hablado— instaron a los genes a crear un cerebro que no sólo fuera grande, sino que además se adaptara para copiar estos sonidos articulados. Resultó de ello la especial aptitud humana para el lenguaje. Se pergeñó a través de una competición memética y una coevolución de memes y genes.

El proceso de la guía memética constituye un ejemplo de replicadores (memes) que evolucionan de forma concurrente con su máquina copiadora (cerebro). No fue en la aparición de los memes cuando se dio el primer caso de evolución concurrente; debió acontecer algo similar en las primeras etapas de la vida en la Tierra, cuando las primeras moléculas replicativas se desarrollaron y evolucionaron hasta constituir la molécula de ADN y todos sus mecanismos de reproducción celular asociados.

Igual que en la evolución de esa depurada máquina copiadora de genes, cabría esperar que apareciera una máquina copiadora de memes mejor. Fue lo que sucedió. El lenguaje escrito supuso un gran salto adelante en lo que se refiere a longevidad y fidelidad. La imprenta realzó la fecundidad. Desde el telégrafo al telé-

CONTRAPUNTO

La teoría de los memes trivializa el desarrollo de la cultura

Robert Boyd y Peter J. Richerson

Los genes son replicadores. Se transmiten fielmente de padres a hijos y dirigen el funcionamiento de los seres vivos. Esta fiel transmisión posibilita la intervención de la selección natural: los genes que ofrecen a sus portadores una mejor supervivencia o que éstos puedan reproducirse más rápidamente que los portadores de otros genes, terminarán por imponerse. Otros mecanismos, así la mutación, desempeñan papeles determinantes en la evolución, pero la adaptación resulta en buena medida de los genes que se repliquen con celeridad mayor. Esta regla tan simple encierra una potencia explicativa sorprendente y ha permitido a los biólogos comprender fenómenos tan dispares como los que han llevado a la formación de la pelvis humana o al ritmo de los cambios sexuales en los peces hermafroditas.



LAS IDEAS suelen sufrir una transformación sistemática al pasar de una persona a otra o de una generación a la siguiente.

Según Susan Blackmore, las creencias e ideas —los memes en su terminología—son replicadores que, transmitidos fielmente por imitación, dirigen el comportamiento de las personas que los adquieren. Siguiendo su tesis, la evolución de las ideas estaría también conformada por la selección natural, y los cambios culturales se deberían a memes de veloz replicación.

Concedámosle, a medias por lo menos, la razón. Los conceptos tomados prestados de la biología son útiles para el estudio de la evolución cultural: consiste la cultura en ideas almacenadas en una población de cerebros humanos, y hay mecanismos análogos a la selección natural que pueden intervenir en qué ideas deben propagarse y cuáles desaparecer. Pero Blackmore comete probablemente un error al pensar que la evolución cultural puede explicarse por selección natural sólo. Muy al contrario, se requiere el concurso de la psicología, la antropología y la lingüística para poner en claro los múltiples procesos que convergen en la creación de la cultura.

A diferencia de los genes, las ideas no se transmiten en su puridad. La información contenida en el cerebro de una persona genera un comportamiento que otra persona trata de imitar tras inferir dicha información. En el proceso transmisor se introducen errores porque las diferencias genéticas, culturales y sociales entre dos personas provocan que el imitador llegue a hipótesis falsas sobre los motivos de la conducta ajena. Por tanto, los memes sufren una transformación sistemática en el paso de un sujeto a otro, un proceso totalmente distinto de la selección natural, que resulta de las diferencias en la velocidad de propagación de los memes. Por culpa de esa transformación de los memes, los miembros de una generación adquirirían en ocasiones un meme diferente del compartido por el conjunto de la generación precedente.

David Wilkins, del Instituto Max Planck de Psicolingüística de Nimega, descubrió un ejemplo sencillo de transformación memética. Observó que los estadounidenses de diferentes generaciones daban una explicación distinta del sufijo *-gate*. Las personas de más de 40 años, asociaban *-gate* a un escándalo de Estado, con el matiz de encubrimiento o tapadera. Conocieron, ya adultos, la presidencia de Richard Nixon e interpretaron constructos tales como *Travelgate* en el mismo sentido que el famoso Watergate. Por el contrario, los americanos más jóvenes, aunque oyeran alguna vez el sufijo *-gate* vinculado a un escándalo federal, lo asociaban ya a cualquier tipo de escándalo. Esta transformación, adviértase, pudo ocurrir sin competencia de los memes alternativos.

Los genes se transforman también mediante mutaciones espontáneas. Pero las mutaciones genéticas ocurren raramente, alrededor de una por cada millón de replicaciones. Ejercen, pues, un efecto despreciable en las adaptaciones directas. Si las mutaciones se presentaran más a menudo, cada diez replicaciones por ejemplo, su efecto se manifestaría sobre la selección de los genes más frecuentes. Esa es la situación que se produce con las ideas, que se transforman rápidamente en su difusión. En esta hipótesis, la evolución cultural conjuga los efectos de la transformación con los de la selección natural.

En la evolución de las ideas intervienen a su vez procesos no selectivos de diverso tipo. Acostumbra suceder, por ejemplo, que una persona tome de otra una idea y la depure o modifique luego; o que sincretice varias creencias tras entrar en contacto con otras personas. Para ofrecer una interpretación correcta de la evolución cultural hemos de considerar todos esos múltiples procesos que orientan los diversos aspectos de dicha evolución. Debemos a los sociólogos avances notables al respecto. Willian Labov, de la Universidad de Pennsylvania, ha descrito procesos sociales y psicológicos que han provocado cambios dialectales en el transcurso de las generaciones. Albert Banduara, de la Universidad de Stanford, ha estudiado la influencia de la imitación en la adquisición de las ideas.

A lo largo los últimos cien años, los biólogos han desarrollado conceptos y herramientas matemáticas que contribuyen a esclarecer la interacción entre los numerosos aspectos que pergeñan la evolución de las poblaciones. Mediante la combinación de estas ideas con estudios empíricos, podría explicarse la evolución de la cultura.

ROBERT BOYD y PETER J. RICHERSON han colaborado durante 25 años en el estudio de la evolución de la cultura humana y de la interacción entre evolución cultural y genética. Boyd es antropólogo de la Universidad de California en Los Angeles; Richerson, biólogo de poblaciones en la Universidad de California en Davis.

CONTRAPUNTO

Las personas no se limitan a imitar

Henry Plotkin

La teoría memética que presenta Susan Blackmore plantea dos problemas importantes. El primero, su afirmación de que la cultura no es más que una colección de memes. En el término cultura lo engloba todo, desde la sencillez del uso de una laja lítica hasta instituciones complejas, un banco por ejemplo. El segundo problema lo entraña su idea de que todos los memes, y por ende todos los aspectos de la cultura, se difunden por imitación. Desde la psicología, ninguna de esas dos hipótesis es admisible.

A principios del siglo XX, Edward Thorndike definía la imitación como el aprendizaje de un gesto a partir de la observación de su ejecución; sigue vigente ese significado en la actual investigación psicológica. Si la palabra *imitación* se usa en esa acepción, las afirmaciones de Blackmore son triviales, ya que las acciones miméticas no transmiten nada con valor cultural. Atarse los zapatos o lanzar una pelota no constituyen gestos de interés para la evolución cultural del hombre.

Pero si adopta la definición de *imitación* dada por Blackmore (cualquier forma de comunicación entre personas, desde transmitir la parte esencial de una historia hasta recordar las instrucciones de un manual leído hace una semana), entonces esta palabra se desdibuja y vacía de sentido. Además, esta definición laxa de imitación no explica ni la existencia ni la evolución de la cultura, que supone mucho más que la simple repetición mecánica de acciones físicas. La cultura humana entraña compartir conocimientos, creencias y valores.

Toda cultura descansa sobre un conjunto de interpretaciones compartidas acerca del funcionamiento del universo, denominadas a menudo esquemas. Las reglas que operan en un restaurante responden a un esquema clásico: lugares donde se prepara la comida, se sirve en la mesa y luego se limpia todo a cambio de dinero. Los niños adquieren la mayoría de los esquemas característicos de su cultura a través de una mezcla de guía informal, procedente de los adultos y compañeros, y de una serie de complejos mecanismos psicológicos que habilitan a la persona para el pensamiento abstracto. La imitación, definida en rigor, no interviene en absoluto en tales mecanismos.

Las creencias y valores compartidos, llamados también constructos sociales, nos llegan de la misma forma compleja y mal entendida. A diferencia de los esquemas, que describen entidades tangibles (los restaurantes), los constructos sociales sólo existen porque las personas se ponen de acuerdo en que lo sean. El dinero es un constructo social. La justicia también. Algunos de ellos poseen carnalidad física, como el billete de banco o la moneda pico, pero todos ellos trascienden su ropaje físico para designar un acuerdo mental respecto a su significado. Sin un convenio sobre el valor de los billetes y las monedas, el dinero carece de valor. Muchas creencias y valores regulan también las interacciones sociales. En la mayor parte de la cultura occidental, por ejemplo, la justicia se basa en conceptos de equidad y propiedad. Otras culturas definen a la justicia partiendo de ideas de servicio o de venganza. En ningún caso se reduce a los juzgados, jueces y prisiones.



LOS CONOCIMIENTOS COMPARTIDOS, como las reglas que operan en los restaurantes, no pueden ser imitados.

No abundan las investigaciones sobre la adquisición del pensamiento abstracto por los niños. Obviamente, el lenguaje tiene algo que ver. Es también muy significativa nuestra capacidad para darnos cuenta de que otras personas tienen intenciones y deseos, una capacidad que los psicólogos llaman “teoría de la mente”. La respuesta a la presión social —otro rasgo psicológico exclusivo de nuestra especie— constituye un poderoso motivo adicional para adherirse a las creencias y valores. Una vez más, la imitación no tiene nada que ver con todo esto. No podemos, aunque queramos, imitar a la justicia. Llegamos a entender su significado paso a paso, a través de conversaciones, estudios, lecturas, películas y similares.

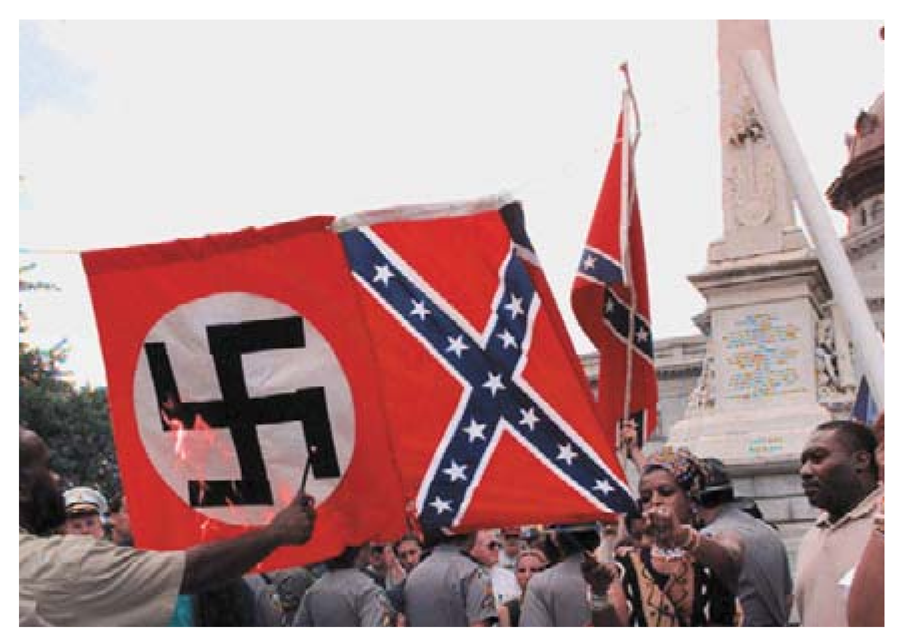
Blackmore sostiene que esta lenta acumulación de conocimientos depende de la imitación. Pero las cosas no son tan lineales. La investigación neurobiológica reciente indica que la imitación requiere mensajes específicos que deben computarse en zonas especializadas del cerebro. Cuando un niño aprende el significado de la palabra restaurante o justicia, atraviesa por etapas psicológicas totalmente distintas de las que le permiten atarse los zapatos.

Los esquemas y los constructos sociales surgen del funcionamiento de la memoria y de la abstracción. No tienen nada que ver con “aprender a ejecutar una acción mediante la observación de los hechos”. La aceptación y difusión de las ideas a través de la sociedad —especialmente de las nociones tan complejas como la de justicia— son lentas, impredecibles y difíciles de medir y, definitivamente, no pueden encuadrarse en la restrictiva teoría de los memes. La cultura, entendida como una colectividad de cerebros y mentes, es el fenómeno más complejo de la Tierra. Jamás lograremos entenderla si la abordamos con simpleza reduccionista.

HENRY PLOTKIN es psicobiólogo del Colegio Universitario de Londres, donde viene trabajando desde 1972. Ha publicado dos libros sobre evolución y conocimiento y está escribiendo un tercero acerca de la evolución de la cultura.

fono celular, del lentísimo correo de postas al correo electrónico, del fonógrafo al DVD y desde el ordenador hasta Internet, la máquina copiadora se ha ido refinando, difundiéndose con celeridad y cantidad crecientes multitud de memes. La revolución informática es el resultado esperado de la evolución memética.

Esta teoría memética depende de varias conjeturas que pueden someterse a contrastación, en particular la hipótesis de que la imitación requiere una gran dosis de potencia cerebral, pese a lo fácil que nos resulta. La investigación, mediante técnicas de imagen, podría comparar entre los individuos que acometen una acción y los que los copian. Contrariamente a lo que indica el sentido común, esta teoría postula que la imitación se lleva la parte más dura y, también, que deben hallarse implicadas en su ejecución zonas cerebrales de evolución más reciente. Además, dentro de cualquier grupo de especies animales emparentadas, los dotados de una mayor capacidad para la imitación deberían tener cerebros más grandes. La pobreza mimética de los animales limita el número de datos disponibles, pero pueden analizarse y compararse, de acuerdo con este criterio, ciertas especies de aves, ballenas y delfines.



5. LAS EMOCIONES despertadas por símbolos ideológicos dan idea de la importancia de los memes y de su poder sobre nuestro comportamiento.

Pruebas experimentales

Si el lenguaje se desarrolló en los humanos como consecuencia de una coevolución de memes y genes, los lingüistas deberían descubrir signos de que el lenguaje transmite memes dotados de fecundidad, fidelidad y longevidad notables mejor que vehicula la información sobre caza, formalización de contratos y otros asuntos específicos. Los experimentos propios de la psicología social deberían mostrar que los individuos prefieren imitar a las personas más elocuentes y las hallan más seductoras que las personas menos expresivas.

Se pueden someter a prueba otras predicciones de la teoría memética por medio de modelos matemáticos y simulaciones numéricas, que muchos investigadores han utilizado para crear modelos de los procesos evolutivos. La incorporación en el sistema de un segundo replicador más rápido debería introducir un cambio radical, análogo a la aparición de los memes y la expansión del cerebro humano. Este segundo replicador debería controlar e incluso detener la evolución del primero. Se podría recurrir a esos modelos para comprender con mayor detalle la coevolución de los memes y los genes. Además, mediante simulación con robots imitadores de ruidos debería demostrarse que el lenguaje pudo haber surgido de forma espontánea en el seno de una población de imitadores.

La memética es una teoría nueva que lucha por encontrar su sitio rodeada de críticas. Alguna de éstas no ha entendido la idea de replicador. Debemos recordar que los memes, al igual que los genes, son meros fragmentos de información que pugnan por hacerse copiar o no se difundirán. Sólo en este sentido, los memes pueden llamarse “egoístas” y tienen poder replicador. Los memes no son entidades mágicas ni ideas platónicas flotantes, sino información contenida en recuerdos, acciones y artefactos humanos específicos. Tampoco abarcan todo el contenido mental, pues no todos los memes se han copiado de alguien. Si se eliminasen nuestros memes, seguiríamos experimentando percepciones, emociones, imaginaciones y habilidades que nos son propias, no adquiridas de otras personas, ni podemos compartir.

Se objeta a menudo que los memes difieren por entero de los genes. Y así es. Evolucionan más deprisa y su dinámica no se halla encerrada en un sistema tan rígido como la replicación del ADN y la síntesis de proteínas. En su naturaleza se parecen, más que a los genes, a unos nuevos replicadores, dotados de sus propios mecanismos de supervivencia y copia. Los memes pueden copiarse en cualquier medio, de la palabra al papel, al libro, al ordenador o a otra persona.

Todavía persisten muchas voces críticas y queda mucho trabajo por hacer. A la postre, la memética sólo merecerá triunfar si aporta explicaciones mejores que sus teorías rivales y ofrece predicciones válidas y comprobables. El gran complejo memético de la ciencia incluye métodos que descartan ideas vacuas, sin sentido o erróneas. De acuerdo con tales criterios deberá enjuiciarse su valor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SELFISH GENE. Richard Dawkins. Universidad de Oxford, 1976 (edición revisada con material adicional en 1989).

CULTURE AND EVOLUTIONARY PROCESS. Robert Boyd y Peter Richerson. Universidad de Chicago, 1985.

DARWIN MACHINES AND THE NATURE OF KNOWLEDGE. Henry C. Plotkin. Penguin, 1993.

DARWIN’S DANGEROUS IDEA. Daniel Dennett. Penguin, 1995.

THE MEME MACHINE. Susan Blackmore: Universidad de Oxford, 1999.

DARWINIZING CULTURE: THE STATUS OF MEMETICS AS A SCIENCE. Dirigido por Robert Aunger. Universidad de Oxford (en prensa).

Descubrimiento de los colorantes sintéticos

Hoy como ayer, los cambios técnicos se producen con notable rapidez. Ciertos avances de la química desempeñaron, tiempo atrás, una función crucial. En sólo unos años la revolución de los colorantes sintéticos acabó con las tinturas naturales

Georges Bram, Nguyên Trong Anh

En el siglo XIX el progreso de la química arrastró el de la industria textil europea, que fabricaba nuevos detergentes para desengrasar las fibras o el agua de Javel para blanquearlas. A su vez, la síntesis de una gama entera de colorantes sintéticos contribuyó al nacimiento de la industria química y farmacéutica moderna.

Antes de 1850, se empleaban colorantes de origen vegetal o animal. No había otros. En Francia, el cultivo de la granza, de la que se extraía un colorante rojo, prosperaba en Alsacia e hizo fortuna en Vaucluse. El índigo para el azul, el palo campeche para el negro, la bija para el rojo-naranja y las cochinillas para el rojo fueron algunos de los productos importados del mundo entero en cantidades crecientes. En sus memorias, Conan Doyle cuenta que por el saco de cochinillas se pagaba en 1881 lo que él recibía por dos años de médico en la marina mercante.

Para obtener otros colores, los químicos empezaron por modificar los productos naturales. Así, uno de los primeros colorantes sintéticos, el muréxido, se prepara por reacción del ácido úrico con el ácido nítrico. Su nombre evoca el púrpura de los antiguos, o "púrpura de Tiro", extraída de un molusco, el múrex. Aunque el muréxido y sus propiedades colorantes se conocían desde finales del siglo XVIII, su preparación se vio largo tiempo dificultada por la escasez de ácido úrico que se debía extraer de la orina de mamíferos, sobre todo de los carnívoros. En 1835 Europa comenzó a importar guano del Perú. Utilizado como abono se convirtió, asimismo, en una fuente asequible de ácido úrico, que permitió la producción de muréxido en Francia a partir de 1855. Este colorante tuvo un gran éxito: se le presentó como el púrpura de Tiro redescubierto, y se organizaron demostraciones de tintura ante Napoleón III en las Tullerías. Con todo, el guano era un producto caro y el muréxido pronto encontró la competencia de una nueva generación de colorantes preparados a partir del alquitrán, un subproducto de la industria del gas del alumbrado; desde 1863, su producción fue ya insignificante.

GEORGES BRAM y NGUYÊN TRONG ANH son profesores de química, aquél en la Universidad de París Sur y éste en la Escuela Politécnica de la capital francesa.



1. DESDE 1835 hasta el inicio de la Primera Guerra Mundial los uniformes del ejército francés se teñían de rojo con granza natural.

Del alquitrán a los colorantes

La fabricación del gas del alumbrado por destilación de la hulla dejaba un residuo, el alquitrán, cuya aplicación práctica se ignoraba. En pequeñas cantidades lo empleaban para fabricar jarcias, para el calafateo de los buques, para revestido de techos industriales e incluso como combustible para las fábricas que operaban con gas.

En los años cuarenta del siglo XIX los químicos revalorizaron el alquitrán de hulla. Obtenían por destilación benceno, naftaleno o antraceno. Estos compuestos, poco conocidos hasta entonces, se convirtieron en las materias primas de la industria de



2. UNIDAD DE PRODUCCION DE INDIGO de la Sociedad BASF, en Ludwigshafen, a orillas del Rin, hacia finales del siglo XIX. En esa época, las fábricas producían 600 toneladas de índigo por año, mientras que la producción anual de índigo natural era de unas 10.000 toneladas. En 1911 se invirtió la relación: 870 toneladas de producto natural frente a 22.000 toneladas de índigo artificial.

colorantes. Durante muchos años, el producto más importante iba a ser la anilina, un derivado del benceno logrado en pequeñas cantidades por destilación del alquitrán; no tardaría en prepararse industrialmente a partir del benceno.

Dos químicos desempeñaron un papel preponderante en la aparición de los colorantes sintéticos: August Wilhelm Hofmann (1818-1892) y su discípulo William Henry Perkin (1838-1907). Alumno suyo desde 1853, fue en 1856 su ayudante en el Colegio Real de Química de Londres.

Desde 1849, Hofmann venía intentando la síntesis de la quinina a partir de derivados del alquitrán de hulla. El paludismo era en esa época una enfermedad muy extendida en Europa, y la quinina, el único remedio eficaz entonces conocido, se extraía de la corteza del quino importada a un alto precio de Hispanoamérica. Las tropas inglesas destinadas en la India la utilizaron en grandes cantidades.

En el pequeño laboratorio de su domicilio familiar, Perkin se dispuso, durante las vacaciones de Pascua de 1856, a sintetizar quinina, de la cual sólo la fórmula $C_{20}H_{24}O_2N_2$ se conocía entonces. Esta fórmula elemental indicaba que una molécula de quinina contenía 20 átomos de carbono, 24 de hidrógeno, 2 de oxígeno y 2 de nitrógeno, pero no explicaba nada sobre la forma en que tales átomos estaban unidos, es decir, sobre la estructura del compuesto. Razonando, tal como él mismo explicaba, “por adición y sustracción”, Perkin comentó que se obtenía la misma fórmula elemental multiplicando por dos la de un derivado de anilina, la alil-toluidina ($C_{10}H_{13}N$), añadiendo al producto dos átomos de oxígeno y sustrayendo dos de hidrógeno (por ejemplo, dos alil-toluidinas y tres oxígenos proporcionarían una molécula de quinina y una de agua).

Ciertamente, se puede calcular así el número de átomos de cada especie, pero nada prueba que se hallen unidos de la misma manera. Perkin hizo reaccionar la alil-toluidina con dicromato potásico, un agente oxidante. El precipitado rojo oscuro obtenido no era la quinina. Perkin podía haberse parado ahí. Por suerte, le interesaba más la química que la quinina, y decidió estudiar la oxidación de la anilina, cuya fórmula C_6H_7N no tiene relación con la de la quinina. Esta vez obtuvo un precipitado negruzco que se disolvió parcialmente en alcohol, dando un espléndido color púrpura. El producto sólido aislado se convirtió en un excelente colorante para tejidos diversos y recibió diferentes nombres: púrpura de anilina, malva o malveína. Otros químicos habían observado que la anilina se coloreaba en presencia de substancias oxidantes, pero el mérito de Perkin residía en la síntesis del colorante y en el descubrimiento de su capacidad tintórea y estable.

El color púrpura

En una época en que el color malva hacía las delicias de la reina Victoria, de la emperatriz Eugenia y de su corte, la malveína se extendió rápidamente por toda Europa. Este color malva tan popular se conseguía en un principio por el muréxido y, sobre todo, por el púrpura francés, un colorante de origen vegetal preparado en 1856 por un tintorero de Lyon a partir de la orchilla, un liquen bajo fermentación amoniacal. El

púrpura francés parecía tener un brillante porvenir, pero la malveína no tardó en suplantarle. El muréxido corrió la misma suerte.

Perkin registró sus patentes en Inglaterra en agosto de 1856 y en febrero de 1857. Ese mismo año extendió su patente a Francia, pero un error en la fecha la invalidó, de manera que su colorante pasó a ser de dominio público. Paradójicamente ese revés aseguró la prosperidad de su inventor: el producto "pirata" hizo crecer la demanda del producto original y contribuyó al éxito de la empresa *Perkin & Sons*, que el propio Perkin había fundado con su padre y su hermano.



Cosechó unos beneficios cuantiosos, pues la malveína se vendía tan cara como el platino. Ahora bien, el dicromato potásico no era un producto oneroso y Perkin había preparado (en seis meses, en el lavadero familiar, mientras esperaba la construcción de su fábrica) una síntesis industrial de la anilina en dos etapas, a partir del benceno con reactivos baratos (ácido sulfúrico, nitrato de sodio, limaduras de hierro, ácido acético). En 1874, labrada una fortuna con sólo 36 años, Perkin vendió su fabrica y dedicó sus esfuerzos con éxito a la investigación básica en química orgánica, en un laboratorio que se hizo construir cerca de su domicilio. Convertido en uno de los padres de la química orgánica, murió en 1907, a la vuelta de un viaje triunfal por Estados Unidos, un año después de que se celebrara en Inglaterra el 50 aniversario del descubrimiento de la malveína.

¿Qué había sucedido con la síntesis de la quinina? Sabemos ahora que los intentos de Perkin no podían llegar a ningún puerto. La alil-toluidina utilizada era una mezcla de dos compuestos muy diferentes de la quinina. Esta última, además, tiene una estructura demasiado compleja para que su síntesis hubiera podido realizarse con los conocimientos y medios de la época. La síntesis no se consiguió hasta 1944, gracias a los trabajos de Robert Burns Woodward, uno de los mayores químicos orgánicos del siglo XX. En cuanto a la "malveína", se trataba en realidad de una mezcla de pseudomalveína, un derivado de la anilina, de malveína, producto de la condensación de la anilina, y de orto y para-toluidina, las impurezas de la anilina comercial de la época.



3. ESTA ESCENA DE BAILE EN LA CORTE DE NAPOLEON III ilustra la fascinación por los colores violetas a finales del siglo XIX. En Inglaterra esta moda fue promovida por la reina Victoria y, en Francia, por la emperatriz Eugenia. Arriba William Henry Perkin.

El color fucsia y los Renard

El descubrimiento de Perkin estimuló otras vocaciones. Los químicos trataron la anilina con múltiples reactivos con la esperanza de obtener colorantes nuevos. Así, en 1859, Emmanuel Verguin (1814-1864), químico de Lyon, logró un colorante rojo muy bello por oxidación de la anilina comercial con tetracloruro de estaño. Los *Établissements Renard Frères*, de Lyon, lo registraron el mismo año con el nombre de fucsina, pues según el texto de la patente su color recordaba el fucsia; pero a menudo se ha recordado que Fuchs significa en alemán "renard" (zorro en francés). No obstante, el éxito de ese producto no pudo evitar la decadencia final de la industria francesa de colorantes.

Tres razones explican dicho declive. En primer lugar, la ley francesa de 1844 sobre patentes protegía el producto final y no el proceso de fabricación. Por tanto, si los químicos mejoraban la síntesis de la fucsina eran llevados sistemáticamente a juicio por los *Établissements Renard Frères* y condenados. Los inventores comprendieron en seguida que debían explotar sus descubrimientos en otros países, como Alemania o Suiza, para beneficio de estos últimos y perjuicio de Francia.

Francia carecía, además, de buenos químicos industriales. En Alemania, desde 1825, las escuelas técnicas (*Technische Hochschulen*), subvencionadas por las regiones, formaban cuadros técnicos de alto nivel para la industria. En Francia, salvo algunos casos aislados, esos cuadros no se formaron hasta 50 años más tarde.

La tercera razón es quizá la más grave. La malveína, la fucsina y otros colorantes de anilina eran el resultado de investigaciones empíricas. Pero el éxito de tales investigaciones, ayer y hoy, depende del azar. Para confiar en obtener los resultados deseados, la investigación debía fundarse en una sólida teoría. Esa teoría, la química orgánica estructural, apareció en los años sesenta, gracias a los esfuerzos de numerosos científicos, entre los que destacan Louis Joseph Gay-Lussac

(1778-1850), Justus von Liebig (1803-1873), Archibald Scott Couper (1831-1892) y, sobre todo, Friedrich August Kekulé (1829-1896), que publicó en 1858 su artículo sobre la tetravalencia del carbono. Gracias a la teoría estructural, los químicos determinaron la estructura de una molécula, estimaron su reactividad y pergeñaron síntesis racionales. Adoptada en Alemania y en Inglaterra, la disciplina fue oficialmente prohibida en Francia, donde numerosos químicos, con Marcellin Berthelot (1827-1907) a la cabeza, rechazaban la teoría atómica. Bajo la influencia de Berthelot —ministro de Instrucción Pública—, la teoría atómica no se enseñó en Francia hasta los últimos años del siglo XIX.

Con las nuevas herramientas conceptuales la industria química alemana creó múltiples colorantes a precios asequibles y eclipsó a su rival francesa. Los progresos alemanes en química orgánica fueron tales, que muy pronto se logró la síntesis de dos colorantes naturales complejos, la alizarina y el índigo. Fruto de una colaboración ejemplar entre universitarios e industriales, esas síntesis convirtieron a Alemania en el centro indiscutible de la industria del tinte y de toda la industria química orgánica hasta la Primera Guerra Mundial. La producción alemana de colorantes representaba, en valor de mercado, el 50 % de la producción mundial en 1881, el 70 % en 1896 y el 80 % en 1900.

August Wilhelm HOFMANN (1818-1892)

Precursor de la química de colorantes de la segunda mitad del siglo XIX, August Wilhelm Hofmann comenzó sus estudios de derecho y lenguas en la Universidad de Giessen, su ciudad natal, pero pronto se orientó hacia la química. Estudió con Liebig, docente allí desde 1824. Hofmann investigó las propiedades del alquitrán de hulla, y particularmente las de la anilina, un tema que le permitió obtener su doctorado en 1841. A instancias del príncipe Alberto, consorte de la reina Victoria, fue nombrado en 1845 director del Colegio Real de Química de Londres.

Aunque el primer colorante sintético fue preparado por Perkin, se sigue considerando a Hofmann el fundador de ese campo de investigación. Descubrió una nueva clase de colorantes de la anilina, los "violetas de Hofmann", que adquirieron gran importancia. En 1865 regresó a Alemania para ocupar la cátedra de química de la Universidad de Berlín. Influyó de manera decisiva en la química inglesa y alemana.



Hofmann (*en el centro*) fue, junto a Graebe y Libermann, el primero en sintetizar la alizarina, principio activo de la granza.

De la granza de Vaucluse a la alizarina renana

De la raíz de la granza se extrae un colorante rojo muy apreciado, utilizado desde 1835 para teñir los uniformes de la infantería y la caballería del ejército francés. El principio colorante esencial es la alizarina, aislada en el laboratorio ya en 1826.

En 1868, Karl Graebe (1841-1927) y Karl Libermann (1842-1914) eran ayudantes de Adolf von Baeyer (1835-1917) en Berlín. Baeyer había demostrado que las moléculas orgánicas complejas podían fragmentarse (degradarse en el argot) por calentamiento en presencia de zinc en polvo. Bae-





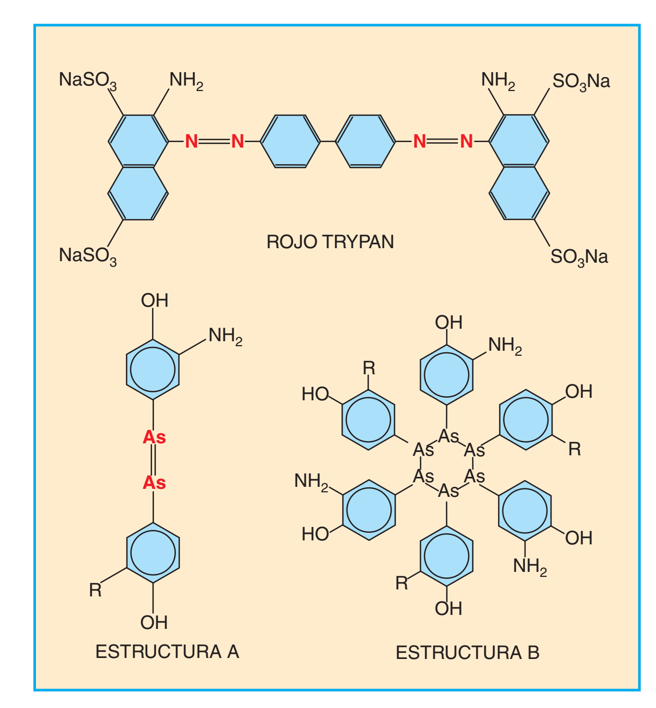
4. LAS PLANTAS TINTOREAS no manifiestan siempre a primera vista los colores a que dan lugar. La granza es un colorante rojo que se extrae de la raíz de la *Rubia tinctorum* (*a la izquierda*). El índigo es una tintura azul intensa, resistente al sol y al lavado, extraída de las hojas y los tallos de la *Indigofera tinctorum* (*a la derecha*). Desaparecido a principios del siglo XX, el cultivo de plantas tintóreas renace, a escala artesanal, como lo atestigua este campo de pastel en Provenza.

yer indicó a Graebe, pese a la reticencia inicial de éste, que aplicara esa reacción a la alizarina. La determinación más simple de las estructuras de los compuestos de degradación permitió, reconstituyendo el rompecabezas, deducir la de la alizarina. Una vez conocida su estructura, la síntesis racional sería posible.

Graebe y Libermann mostraron que el esqueleto de la alizarina coincidía con el del antraceno, un hidrocarburo obtenido en la destilación de la hulla. Consiguieron pronto transformar con éxito el antraceno en alizarina; para ello contaron con la colaboración de Heinrich Caro (1834-1910), especialista alemán en colorantes sintéticos, que acababa de regresar de Inglaterra para asumir la dirección científica de una joven empresa renana con gran futuro, la Badische Anilin & Soda Fabrik (BASF). Mediante la explotación de las patentes de alizarina y de sus colorantes derivados, la empresa labró su prosperidad. Perkin, que había igualmente realizado la síntesis de la alizarina a partir del antraceno, patentó su proceso el 26 de junio de 1869, ¡un día después que Caro, Graebe y Libermann! Perkin y sus colegas alemanes se pusieron rápidamente de acuerdo para colaborar e intercambiar licencias de fabricación.

Con la depuración de los procesos de síntesis se abarató el precio de la alizarina. En Francia las autoridades subvencionaron durante un tiempo a los productores de granza para que pudieran continuar utilizando el colorante natural para teñir los uniformes militares.

Sin embargo, la medida no evitó la catástrofe. Un quintal de granza natural valía 200 francos en 1865, pero sólo 25 francos diez años más tarde. En 1872, los agricultores franceses producían todavía 23.000 toneladas de polvo de granza, es decir, más de la mitad de la producción mundial. En 1878 apenas se cosecharon 500 toneladas, mientras que la producción de alizarina sintética equivalía ya a 30.000 toneladas de granza. En la misma línea, los químicos alemanes se adueñaron del mercado del índigo.



5. EL ROJO DE TRYPAN (*arriba*) se utilizaba para combatir la enfermedad del sueño. Se atribuía su eficacia al doble enlace de nitrógeno (–N=N–). Buscando otros compuestos con dobles enlaces, Paul Ehrlich descubrió, en 1909, la arsenamina, bastante eficaz contra la sífilis. Incapaz de determinar su estructura, pensó que presentaba la estructura A. En 1961 se demostró que este compuesto tenía una estructura muy diferente (B), sin dobles enlaces entre los átomos de arsénico.

Y Baeyer (re)creó el índigo

El empleo del índigo, uno de los colorantes más antiguos conocidos, no ha decaído. Antes bien, la moda de los "tejanos", iniciada hace unas décadas, le dio una nueva juventud. Su importación europea desde el siglo XVI arruinó a regiones enteras que se dedicaban al cultivo del pastel, de donde se obtenían diferentes tonalidades de azul. Toulouse y su región se resintieron gravemente. El comercio del índigo en el siglo XIX estaba controlado por Inglaterra, que había establecido en la India numerosas plantaciones. Pero eso pasó a la historia, cuando la compañía BASF, después de su éxito con la síntesis de la alizarina, consiguió también la del índigo. Tres químicos desempeñaron una función clave en el descubrimiento, dos universitarios, Baeyer y Carl Heumann (1850-1893), y un químico industrial, Caro, que colaboró con Baeyer a partir de 1876.

El problema no era nada sencillo. Baeyer había empezado sus trabajos en 1865. Pese a su excepcional talento, no consiguió identificar la estructura del índigo hasta 1883. Obtuvo, sin embargo, en 1868, una estructura parcial que guió sus investigaciones de síntesis. Baeyer realizó en 1878, y después en 1882, la síntesis del índigo por dos vías diferentes. No obstante, estos procesos eran muy enojosos, y fue una tercera síntesis (1890), la de Heumann, la que se explotaría desde 1897.

Entre la primera patente de 1880 y la comercialización del producto, pasaron 17 años, un período en el que BASF invirtió 18 millones de marcos-oro. Aunque se trataba de una suma superior al valor del capital de la empresa resultó rentable: en 1897 Inglaterra comercializó 10.000 toneladas de índigo natural, y Alemania 600 toneladas de índigo de síntesis. En 1911 las cifras eran de 870 toneladas de producto natural y de 22.000 toneladas de índigo artificial. El gobierno británico protegió el índigo natural aplicado a la coloración de los uniformes militares, pero se repitió para los agricultores ingleses la historia sufrida con la granza francesa. Entre 1886 y 1914 el 90 % del comercio de índigo de la India con Europa se desvaneció. La empresa BASF continúa siendo hoy el principal fabricante de índigo con un 40 % de la producción mundial (en cifras del ejercicio 1997), estimada en 17.000 toneladas, con la que se tiñen 800 millones de "tejanos".

El factor suerte

En el siglo XIX la química era todavía una ciencia joven, y el azar desempeñaba un papel nada despreciable en los descubrimientos; por ejemplo, los de la malveína o la síntesis de la alizarina. La síntesis de ésta consistía en oxidar el antraceno con ácido nítrico para formar antraquinona, e introducir después los grupos OH que faltaban. La última operación debía efectuarse de manera indirecta haciendo reaccionar previamente el ácido sulfúrico con la antraquinona; pero esta reacción, clásica hoy, no se alcanzaba en la época.

Graebe y Libermann fracasaron, y Caro retomó el problema enfrentándose a las mismas dificultades. En uno de sus últimos ensayos Caro se

ausentó un momento de su laboratorio. A su vuelta observó que se había producido un recalentamiento: parte de la mezcla de la reacción se había incrustado en el techo del laboratorio, pero el resto del matraz constituía el producto deseado. Sin este feliz accidente Caro habría estado, sin duda, mucho más tiempo bloqueado: la reacción que él buscaba sólo se producía a una temperatura muy elevada, que ningún químico razonable habría aplicado por miedo a destruir la antraquinona, y sabiendo además que el ácido sulfúrico es un agente muy corrosivo (basta fijarse en lo que acontece si derramamos unas gotas de ácido sulfúrico sobre un terrón de azúcar, a temperatura ordinaria). Por no hablar de los riesgos para el experimentador.

Johann Friedrich Wilhelm Adolf von BAEYER (1835-1917)

Tras defender en 1858, en Berlín, su tesis doctoral Johann Friedrich Wilhelm Baeyer pasó por modestos puestos docentes en la misma ciudad hasta 1872. Anexionada Alsacia a Alemania, se le nombró profesor en Estrasburgo. Su obra, notable, destaca también por su amplitud de intereses. Sintetizó el índigo y numerosos colorantes de la serie de las fluoresceínas y de las ftaleínas. En 1864 preparó el ácido barbitúrico, cuyas propiedades hipnóticas no se establecieron hasta 1903. Se han propuesto dos orígenes posibles de este nombre: para unos, el ácido barbitúrico se habría preparado el día de Santa Bárbara; para otros, recordaría el apellido de un amigo de Baeyer. El nombre de Baeyer va también ligado a la teoría de las tensiones, que avanzó en 1885 para interpretar las diferencias de estabilidad de las moléculas cíclicas según su tamaño. Baeyer recibió el premio Nobel de química en 1905.

De los colorantes a la quimioterapia

No siempre fue la casualidad. El nacimiento de la quimioterapia, resultado de la investigación en colorantes sintéticos, pone de manifiesto de qué modo el desarrollo paciente de una idea lógica y simple ha permitido salvar millones de vidas.

El médico alemán Paul Ehrlich (1854-1915) llamó quimioterapia a la destrucción de los gérmenes patógenos del enfermo por medio de sustancias químicas. ¿Cómo se descubrieron?

Siendo estudiante de medicina, Ehrlich se interesó por la coloración de las muestras de tejidos y cultivos microbianos, que examinaba a través del microscopio. En su tesis doctoral sobre los colorantes histológicos, subrayó que la tintura de bacilos y bacterias se convertía en un método de ataque selectivo de los propios colorantes; y se le ocurrió entonces buscar agentes bactericidas en esa familia de compuestos. En 1891 utilizó azul de metileno para tratar, con excelentes resultados, a dos enfermos de una forma benigna de malaria.

Trece años después empleó rojo de Trypan para curar la enfermedad del sueño. Atribuyendo la eficacia del rojo Trypan a la presencia de dobles enlaces de átomos de nitrógeno (–N=N–), Ehrlich preparó numerosos compuestos que contenían un grupo análogo pero con arsénico (–As=As–). Sintetizó así la arsenamina y demostró en 1909 que se trataba de un compuesto activo contra los tripanosomas y las espiroquetas, bacterias responsables respectivamente de la enfermedad del sueño y de la sífilis. No había por entonces otro método de análisis de productos que el análisis elemental; éste aporta sólo la fórmula elemental de la sustancia con un factor multiplicativo. Pensando que el producto final contenía un doble enlace de arsénico, Ehrlich le atribuyó la estructura de un monómero con un doble enlace de arsénico. Se comercializó al año siguiente con el nombre de Salvarsán ("arsénico que salva"). El Salvarsán tuvo un éxito terapéutico y mediático considerable, ya que fue el primer medicamento realmente eficaz contra la sífilis.

En 1961 se demostró que el Salvarsán no contenía grupos de átomos de arsénico con dobles enlaces y se descubrió su genuina estructura trimérica, formada por el triple de átomos que la fórmula elemental.

Los éxitos de Ehrlich fueron precursores del descubrimiento de una ingente gama de medicamentos aparecidos en la primera mitad del siglo XX. Uno de los hallazgos principales se hallaba vinculado a las enfermedades bacterianas; contra ellas no había todavía ningún medicamento eficaz en los comienzos de los años treinta. La investigación se centró entonces en los colorantes, por su gran afinidad con las proteínas.

En 1934, Gerhard Domagk (1895-1964) anunció que el producto comercializado por la sociedad *I. G. Farben* con el nombre de Prontosil curaba las estafilococias y las estreptococias agudas. El año siguiente Jaques Trefouël (1897-1977) y sus colaboradores del equipo de Ernest Fourneau (1872-1949), del Instituto Pasteur, demostraron que esa sustancia se metabolizaba en sulfanilamida, su forma activa. *In vivo*, mostraba la eficacia del *Prontosil* y, a diferencia de éste, se mantenía activa *in vitro*. Así llegaron las sulfamidas, los medicamentos más eficaces antes del advenimiento de los antibióticos.

La simbiosis entre industria e investigación propició numerosos descubrimientos —nuevos colorantes, nuevos medicamentos— y también el desarrollo de una industria que prefiguró la industria química actual.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE RAINBOW MAKERS: THE ORIGINS OF THE SYNTHETIC DYESTUFFS INDUSTRY IN WESTERN EUROPE. Anthony S. Travis. Associate University Press, 1993.

GUIDE DES TEINTURES NATURELLES. Dominique Cardon y Gaëtan du Chatenet. Delachaux et Niestlé, 1990.

REGARDS SUR L'HISTOIRE DES COLORANTS ARTIFICIELS AU XIXe SIÈGLE. Danielle Fauque en *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 88, n.º 769, págs. 1753-1174, diciembre 1994.

THAT OLD MOOD INDIGO. Jan Altmann y Karin Elbl-Weiser en *Chemistry and Industry*, vol. 16, pág. 654, 1997.

LOS ADOLESCENTES japoneses se conectan a Internet con sus teléfonos iMode.

Internet inalámbrica

Se han dedicado a Internet más hipérboles vacuas que a ninguna otra innovación desde el cable de 500 canales. "La nueva economía ofrece sinergias de desintermediación para la empresa en el mercado B2B de rápida andadura", o cualquier otra zarandaja. Extraer la verdad que encierran estas frases puede ser empeño arduo. Y aún más difícil cuando los mecanismos de mercadotecnia se acoplen a la última y más deslumbrante maravilla de la técnica, la Telaraña inalámbrica.

Este informe especial describe un concepto básico bastante simple: ofrecer acceso a Internet desde teléfonos celulares, ordenadores y otros aparatos portátiles. Pero la idea no es nueva —hasta en los Estados Unidos, donde esta práctica ha tardado más en penetrar, tales dispositivos se comercializan desde mediados los años noventa—, ni tampoco promete una venta segura. Las redes de datos han sufrido numerosas trabas: normas incompatibles, extrañas interfaces de usuario, tarifas de servicio penalizadoras y dificultades en la atribución del espectro. Podrían, tal vez, seguir el camino de las redes telefónicas de satélites, como Iridium, que ya ha empezado a caer (literalmente) a tierra.

Dicho esto, hasta los más escépticos concederían a la Red inalámbrica unas francas probabilidades de éxito. La fatua retórica de las ventas no debe hacer olvidar los evidentes logros de la ingeniería. No es nada fácil difundir datos por las ondas radioeléctricas. Había buenas razones para tomar el código Morse como base de las comunicaciones por radio: a veces sólo las señales más simples pueden atravesar el encrespado mar de las perturbaciones estáticas. A lo largo de decenios y en parte gracias a los esfuerzos de los radioaficionados, la fiabilidad y la rapidez de las comunicaciones de datos han mejorado poco a poco, aunque de forma incesante. Las redes inalámbricas actuales transmiten datos a velocidades próximas a los 10 kilobit por segundo, que era la velocidad regular de un módem hacia 1990, y los operadores prometen mejorar cien veces esta cifra en el plazo de muy pocos años. Lleguen o no a cumplirse estas asombrosas predicciones, la Red inalámbrica se va tejiendo lentamente en nuestra vida cotidiana.

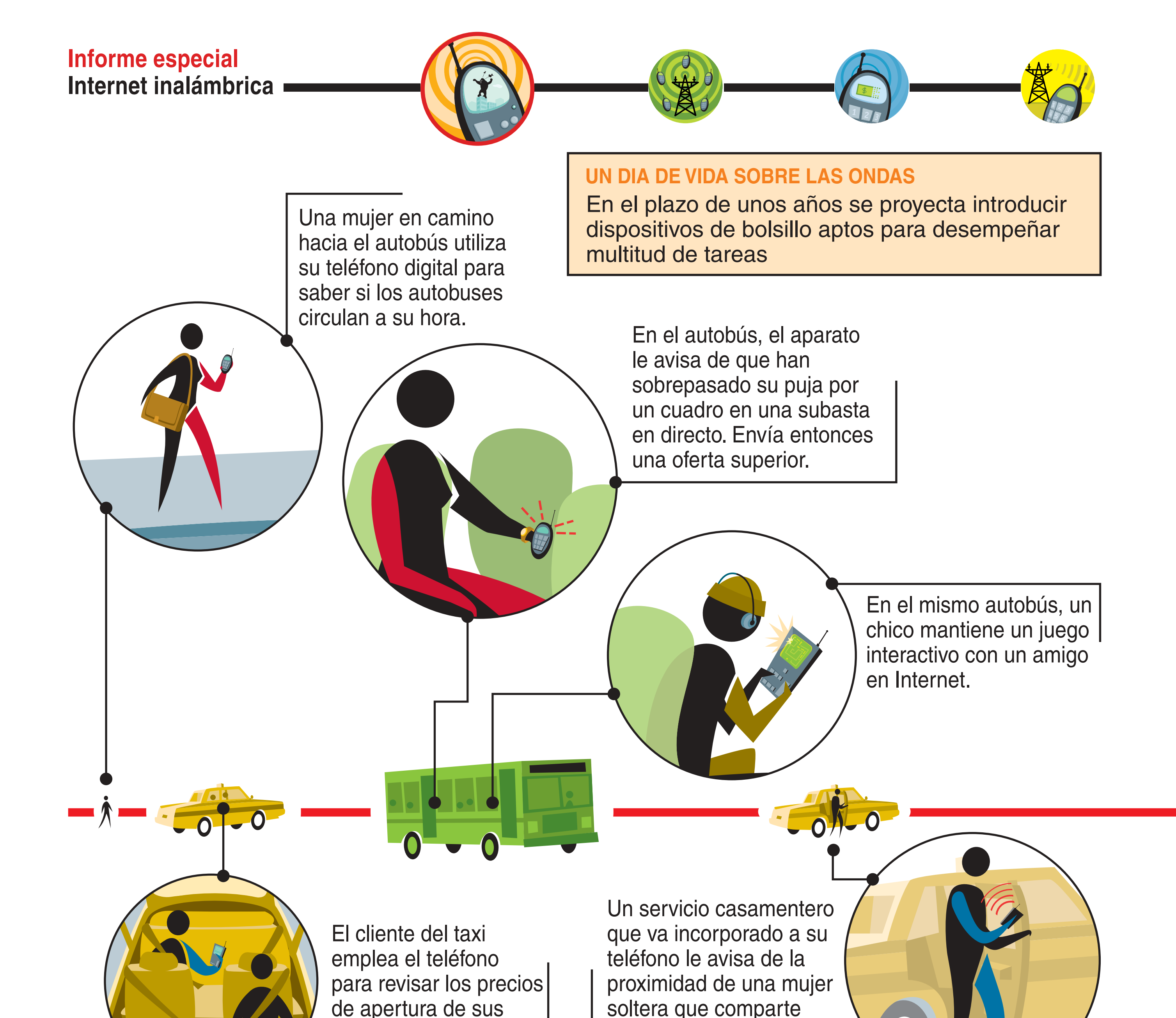
—Mark Alpert y George Musser







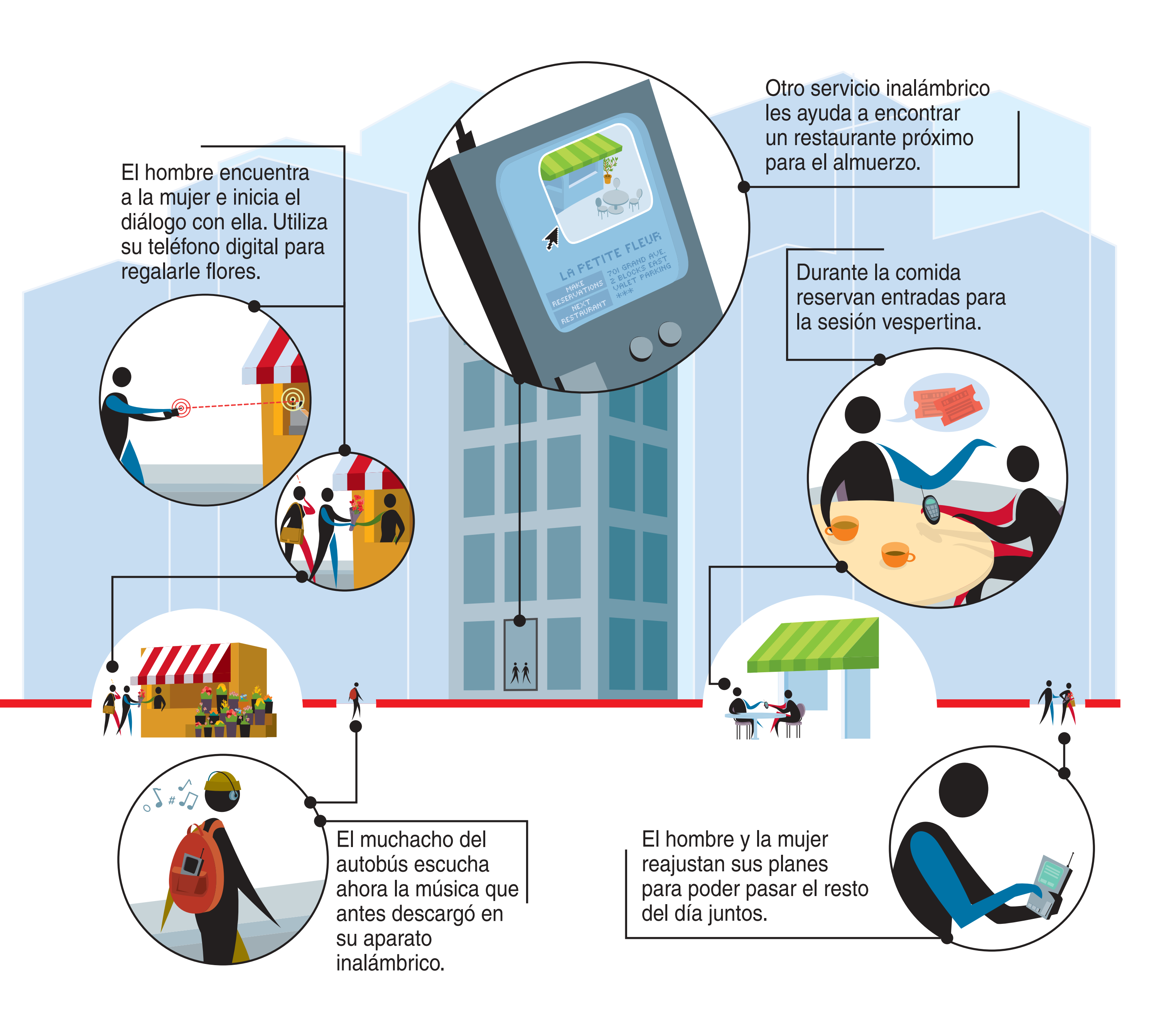




Internet en sus manos

Para crear una red Internet inalámbrica, los ingenieros construyen redes capaces de cursar ingentes volúmenes de datos y aparatos móviles que puedan explotar todos los recursos de la red Internet actual

Fiona Harvey



Imagínese en un viaje de negocios por Nueva York en el 2005, pasando ante las tiendas lujosas de la Quinta Avenida. De pronto suena el aviso del inseparable móvil digital, y al sacarlo del bolsillo lee una noticia alarmante en la pantallita: han caído las acciones de su compañía. Desde esa misma acera, usted vocea "¡acceso a finanzas personales!" al micrófono de su aparato, y éste llama inmediatamente a la página del sitio de operaciones bursátiles preferido. Ante las miradas curiosas de otros peatones, usted comenzará a vender acciones para reducir riesgos de pérdidas. Seguidamente, ordenará a su móvil que la agencia acostumbrada de líneas aéreas le reserve un pasaje en el próximo vuelo de regreso a la sede de su empresa. Con el mismo aparato se pondrá en contacto con su esposa para informarle del cambio de planes. Por último, podrá pedir al móvil direcciones de bares cercanos, pues necesita un buen trago antes de dirigirse al aeropuerto.

Aunque esta escena parezca pura fantasía, muchas de las grandes empresas de telecomunicaciones gastan ingentes sumas en llevarla a la realidad. Su motivación reside en el enorme número de usuarios de la telefonía celular. Solamente en Estados Unidos, utilizan teléfono móvil unos 95 millones de personas, cerca del 34 por ciento de la población. Y en numerosos países de la Europa occidental la penetración de este servicio supera el 50 por ciento; un 71 por ciento en Finlandia, el país más fanático de la telefonía móvil en todo el mundo. Aunque sólo una pequeña parte de los usuarios se abonara también a servicios de datos, ello supondría un mercado vastísimo.

Se está preparando ya la infraestructura para una Telaraña inalámbrica, aunque en Europa y Japón se ha



¡Visítelo!
www.ou.edu/engineering/emc/standard.html

Este sitio ofrece detalles técnicos sobre las bandas de frecuencia y métodos de modulación utilizados por las redes inalámbricas en Estados Unidos, Europa y Japón.

avanzado más aprisa que en EE.UU. En Finlandia, se envían por teléfono móvil mensajes de texto a los amigos, se pagan facturas, se reciben boletines de tráfico y se abona la consumición en los bares sin más que marcar las cifras apropiadas. En Japón, los adolescentes se vuelven locos por el teléfono iMode con acceso a Internet, que ha captado ya más de 10 millones de usuarios. Las compañías estadounidenses han tardado más en ofrecer estos servicios, sobre todo porque las redes inalámbricas en competencia utilizan diferentes técnicas para la transmisión de señales. Con todo, en el pasado año, los principales operadores del país han lanzado agresivas campañas para persuadir a sus clientes de que adquieran teléfonos celulares dotados de acceso a Internet. Además, los nuevos ordenadores de bolsillo, como el *Palm VII*, incorporan antenas para el acceso inalámbrico a Internet, y en otros modelos esto se consigue por un teléfono móvil o un módem con antena anexo.

Actualmente todos estos aparatos se ven limitados por la lentitud de la transmisión de datos por vía radioeléctrica, en torno a los 10 kilobit por segundo, menos de la quinta parte de la velocidad de un módem de ordenador personal corriente por línea telefónica fija. Unas velocidades tan bajas pueden cubrir necesidades elementales como el envío de mensajes de texto, pero no una satisfactoria navegación por Internet, y quedaría prácticamente excluida la descarga en un aparato móvil por vía inalámbrica de ficheros de vídeo, audio u otros de gran contenido de datos. Por si esto fuera poco, muchas de las redes inalámbricas de datos actuales están limitadas a grandes urbes, lo que impide el acceso a Internet desde el exterior de la zona de cobertura.

Existen, sin embargo, nuevas técnicas radioeléctricas que prometen salvar algunos de estos escollos. Los teléfonos celulares de la primera generación eran aparatos analógicos que transmitían una señal eléctrica proporcional a la intensidad sonora de la voz. Hoy día los teléfonos móviles usuales son digitales, de la segunda generación: convierten la información de sonido en bits de datos que se transmiten por ondas de radio moduladas o microondas. Por último, las compañías de telecomunicación trabajan en la creación de redes inalámbricas de la tercera generación (3G), en las que los aparatos móviles puedan transmitir datos hasta a dos megabit por segundo. A esta velocidad los usuarios podrían ya descargar de la red canciones y películas. En particular, los operadores de telefonía móvil de todo el mundo están desarrollando la técnica denominada acceso múltiple por división de código en banda ampliada (AMDC-BA), la cual permite elevar las velocidades de transmisión al esparcir cada señal inalámbrica en una banda de frecuencias más amplia [*véase* "El salto de la tercera generación", *en este mismo número*].

En el Reino Unido se han adjudicado ya licencias para utilizar las secciones del espectro radioeléctrico que requieren las redes 3G, y la subasta de las bandas de frecuencia proporcionó a ese gobierno cerca de 6,7 billones de pesetas. En Estados Unidos se preparan planes de adjudicación similares. Hay operadores inalámbricos como British Telecommunications, Vodafone y France Telecom que prometen tener ya redes 3G instaladas en el Reino Unido en el 2002, pero es difícil predecir cuándo llegarán a extenderse realmente los servicios de datos de alta velocidad. Es casi seguro que los núcleos rurales tendrán que esperar más tiempo que las grandes ciudades. La firma consultora Forrester Research, de Cambridge, Massachusetts, sostiene que antes de 2010 no podrán prestarse servicios de la tercera generación fuera de las grandes áreas metropolitanas.

Entre tanto, ciertos operadores preparan soluciones intermedias, las llamadas redes 2,5G. En Estados Unidos, por ejemplo, la compañía Sprint PCS tiene en proyecto elevar hasta 144 kilobit por segundo la velocidad de sus aplicaciones en Internet mediante técnicas de conmutación de paquetes. Casi todas las redes inalámbricas ac-

Dispositivos inalámbricos del futuro





LOS ARTILUGIOS DEL MAÑANA pueden tener aspecto muy diferente de los actuales teléfonos de bolsillo. A la izquierda, el prototipo *NAK* probado por Lernout & Hauspie permite el dictado de mensajes electrónicos y emite órdenes verbales. Nokia ha desarrollado bases de diseño para teléfonos que puedan visualizar imágenes y vídeo de la red (*derecha*).

tuales se basan en la conmutación de circuitos: a cada conexión establecida se le asigna un canal de frecuencia específica hasta el final de la llamada. Con la conmutación de paquetes, en cambio, la señal se trocea en paquetes de datos. Cada paquete individual, tras añadirle una etiqueta con su dirección de destino, se lanza a buscar su propio camino a través de los canales disponibles en la red, recomponiéndose luego los paquetes en el orden correcto en el extremo receptor. Al poder entremezclar en un solo canal paquetes de datos de muchos orígenes distintos, este sistema permite trabajar a velocidades de transmisión más elevadas que los de conmutación de circuitos. Un usuario de redes de conmutación de paquetes podría al mismo tiempo hablar por su teléfono celular y conectarse a Internet. Y como las señales sólo ocuparán un canal de la red mientras que los teléfonos estén transmitiendo o recibiendo datos, los usuarios pagarán por el volumen de datos que descarguen y no por el tiempo que hayan permanecido en la red.



Por desgracia, se tropieza aquí con un grave inconveniente. El reagrupamiento y recomposición de los paquetes de datos en su punto de destino lleva cierto tiempo, y hay paquetes que se pierden y han de ser reenviados. Este retardo se denomina tiempo de latencia. Esto no afecta a la mayoría de las transmisiones de datos, en las que puede tolerarse un retraso de algunos segundos, pero la pérdida de bits en las señales de voz puede tornar penosa la conversación. Se ha intentado reducir al mínimo el problema con métodos como la supresión de silencios, que elimina los períodos mudos de las comunicaciones de voz (aproximadamente el 30 por ciento de cualquier conversación telefónica). Los paquetes de datos que no contienen señal de voz quedan sin transmitirse, con lo que se reduce el tráfico de la red y, por tanto, disminuye la latencia.

Superteléfonos

Los fabricantes de teléfonos celulares ensayan varios diseños diferentes para los aparatos que hayan de conectarse a las redes inalámbricas perfeccionadas del futuro. Para que estos aparatos se comporten como verdaderos complementos digitales habrán de ser versátiles, adaptables y elegantes. En la gama alta de la línea de productos, compañías como Nokia, Ericsson y Motorola desarrollan "superteléfonos" de la tercera generación, que en nada recordarán a los móviles existentes. En realidad, parece absurdo llamarles teléfonos. Tendrán grandes pantallas en color para la presentación de gráficos y vídeo de alta resolución. Algunos incluirán teclados y ratones miniatura para la introducción de datos, pero en su mayoría utilizarán pantallas táctiles y punteros como los que ahora se emplean en las máquinas *Palm* y otros ordenadores de bolsillo.

Además de cursar comunicaciones de voz, los superteléfonos podrán reproducir ficheros de música que circulan por la red en el popular formato MP3 (o en cualquier otro que lo sustituya). Sin duda, esta aplicación puede abrir un vasto mercado nuevo a estos aparatos. "Creo que la música acabará por destruir la Internet móvil", afirma Robert Madge, fundador de la firma británica Madge Networks. Los usuarios de ordenadores personales que hayan pasado horas intentando descargar música de la red quizá se burlen de esta predicción. Pero cabe imaginar un servicio de acceso de alta velocidad dedicado exclusivamente a la distribución de música que pueda enviar ficheros de audio muy comprimidos a los aparatos móviles cuando éstos no se utilicen para otra aplicación (de noche, por ejemplo). La información musical podría luego almacenarse en memoria, acaso en tarjetas como las *Memory Sticks* de Sony, hasta que el usuario la necesite.

Para los usuarios que prefieran la palabra escrita habrá dispositivos móviles con pantallas mayores para la lectura de libros electrónicos. Algunas compañías han desarrollado prototipos equipados con videocámaras y proyectores diminutos para ver películas descargadas de la red.

Casi todos los prototipos incluyen auriculares separados del cuerpo del aparato, y muchos de ellos, cascos que a la vez contienen auricular y micrófono de manera que los usuarios puedan hablar, escuchar y ver la pantalla al mismo tiempo. Para que no haya necesidad de cables, muchos prototipos utilizan ondas radioeléctricas de baja potencia para la transmisión de señales entre el casco y el cuerpo del aparato. Varias compañías han incorporado ya en sus actuales líneas de producto dispositivos de radio de corto alcance, basados en una norma industrial llamada *Bluetooth*. Por la misma técnica podrían también transmitirse datos entre el teléfono digital y cualquier dispositivo próximo, como las cajas registradoras de supermercados y otros comercios, permitiendo así que los usuarios realicen transacciones sin dinero, cheques ni tarjetas de crédito.

Pese a las cuantiosas inversiones dedicadas al diseño de estos superteléfonos —la construcción de un prototipo puede costar casi 500 millones de pesetas—, los analistas predicen que los aparatos de la gama más alta sólo ocuparán una pequeña parcela del mercado. "La mayoría de la gente no necesitará tener vídeo de movilidad total mientras se desplaza", afirma Lars Godell, de Forrester Research, quien cree que abundarán más los "teléfonos inteligentes". Estos aparatos se asemejarán a los teléfonos celulares de hoy, con pantallas algo mayores y mejores opciones de entrada que el teclado alfanumérico actual. Las posibilidades de los teléfonos inteligentes se limitarán, casi con seguridad, al envío y recepción de correo electrónico, al acceso a Internet (probablemente a través de portales adaptados al efecto, como los que hoy utilizan los teléfonos celulares navegadores) y tal vez a la reproducción de la música descargada.

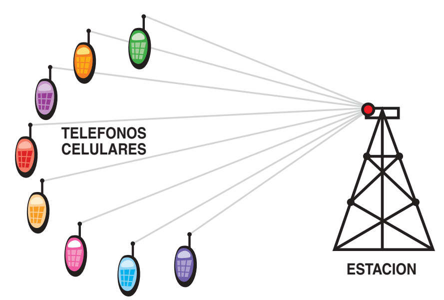
Las compañías telefónicas no son las únicas que acechan el mercado. Los fabricantes de ordenadores de bolsillo, hasta ahora utilizados sobre todo para apuntar ci-

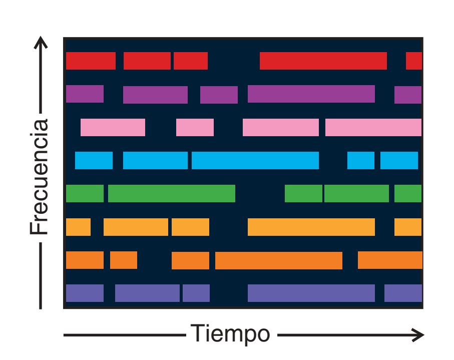
EL ABC DE LO INALAMBRICO

ESTE GLOSARIO DEFINE LOS ACRONIMOS USUALES QUE IDENTIFICAN LAS TECNICAS INALAMBRICAS, AGRUPADOS EN TRES CATEGORIAS QUE CORRESPONDEN A FASES DE DESARROLLO DE LAS REDES.

PRIMERA GENERACION: ANALOGICO

(Comienzo del decenio de los ochenta hasta ahora)
Los primeros teléfonos celulares utilizaban técnica analógica: las señales radioeléctricas del teléfono se modulaban —variando su frecuencia de una manera continua— con el fin de que pudieran transportar los sonidos emitidos por el usuario.





EL ACCESO MULTIPLE por división de frecuencia permite que muchos teléfonos celulares se comuniquen con una estación de base (*izquierda*). A cada usuario emisor se le asigna un canal de frecuencia diferente (*arriba*). Los cortes en las barras coloreadas indican que los canales no están constantemente utilizados.

AMPS (Sistema de telefonía móvil perfeccionado)
Es el tipo más corriente de red de telefonía celular analógica. Dado que los teléfonos analógicos son adecuados para comunicaciones de voz y no de datos, las redes AMPS se están sustituyendo por redes inalámbricas digitales. Opera en la banda de frecuencias de 800 megahertz con la técnica AMDF.

AMDF (Acceso múltiple por división de frecuencia)
Esta técnica permite que muchos usuarios de teléfonos celulares se comuniquen con una estación de base, asignando a cada usuario un canal de frecuencia diferente. Una red AMPS tiene, por ejemplo, 832 canales separados a unos 30 kilohertz. En las redes digitales se utiliza la AMDF conjuntamente con la AMDC o la AMDT.

SEGUNDA GENERACION: DIGITAL

(Desde comienzos del decenio de los noventa hasta ahora)
Los teléfonos celulares más avanzados emplean hoy técnicas digitales, que convierten los sonidos vocales emitidos por el usuario en trenes de bits (unos y ceros), utilizados luego para modular las señales inalámbricas. Las redes digitales pueden también utilizarse para la transmisión de datos.

AMDC (Acceso múltiple por división de código)
Esta técnica digital permite que los usuarios de telefonía celular compartan un canal de frecuencia. Cada señal inalámbrica se divide en muchos “fragmentos” de datos, y cada uno de ellos se etiqueta con el código del usuario celular. Durante la transmisión los fragmentos se esparcen sobre una banda de frecuencias y se recomponen luego en el extremo receptor.

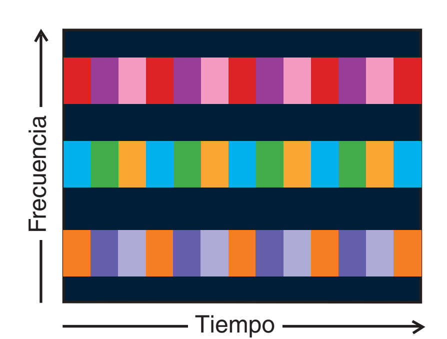
tas y compilar listas de direcciones, también están introduciendo dispositivos capaces de acceder a Internet. Algunos de ellos además se plantean añadir comunicaciones de voz a sus máquinas a fin de que puedan competir directamente con los superteléfonos. Incluso los productores de consolas de videojuegos se están incorporando a la refriega: según Godell, se espera que Nintendo y Sony equipen sus consolas GameBoy y Playstation con acceso a Internet en el plazo de uno o dos años. Y a medida que más usuarios obtengan sus piezas musicales de la red y no de cintas o compactos, los fabricantes de reproductores de música portátiles empezarán a producir modelos capaces de descargar ficheros MP3 de Internet por vía inalámbrica.

Otra idea interesante es el reloj Internet. En colaboración con Swatch, el mayor fabricante mundial de componentes de reloj, Hewlett Packard va a crear un dispositivo inalámbrico de estilo sugestivo. Dentro de la apariencia de un reloj normal se encerrará un diminuto radiotransmisor que permitirá al usuario descargar de la red resultados deportivos, correo electrónico y música.

La guerra por la informática

Paralelamente con la competición entablada entre los fabricantes de equipos, va a disputarse una batalla similar por el programa lógico que ha de controlar todos estos aparatos. Hay varios competidores en liza. Uno es el sistema operativo desarrollado por Palm para sus ordenadores de bolsillo, que también se utiliza en los *Visor* de Handspring. Otro es el EPOC, sistema operativo creado por Psion y empleado asimismo en los teléfonos celulares navegadores de Internet de Nokia y Ericsson. El tercer contendiente es Microsoft, percatado de la importancia de las plataformas portátiles al descender las ventas de ordenadores personales. En 1996 esta firma dio a conocer el *Windows CE*, versión reducida de su conocido sistema operativo, para utilizarse en ordenadores de bolsillo de Hewlett-Packard, Compaq y Casio. Ahora Microsoft desarrolla programas lógicos especialmente destinados a teléfonos inteligentes y se ha asociado con otros fabricantes, como Ericsson, para crear aparatos móviles a la medida de determinadas actividades: por ejemplo, las de médicos, abogados o niños. Dada la gran variedad de aparatos, la mayoría de los observadores coinciden en que no habrá un ganador único en esta guerra informática, en contraste con el dominio que ejerce Microsoft en el campo de los sistemas operativos para ordenadores personales.

Como los avances de la técnica permiten una continua miniaturización de baterías y componentes electrónicos, el tamaño de los aparatos móviles vendrá condicionado por las pantallas y los sistemas de entrada, que han de ser de amplitud suficiente para que el usuario los vea y los maneje. Pero, ¿qué pasaría si el usuario pudiera relacionarse oralmente con el aparato en vez de



EL ACCESO MULTIPLE por división de tiempo permite que muchos usuarios compartan un canal de frecuencia. A cada llamada inalámbrica se le asigna un intervalo de tiempo repetitivo (*bandas en color*) dentro del canal.

GSM (Sistema global de comunicaciones móviles)
Es la norma europea para redes digitales que garantiza la compatibilidad de aparatos digitales: un teléfono celular alemán puede utilizarse en una red francesa, y viceversa. Utiliza la técnica AMDT y opera en la banda de frecuencias de 900 megahertz.

PCS (Servicio de comunicaciones personalizado)
Es un tipo de red inalámbrica digital en Norteamérica que funciona en la banda de frecuencias de 1900 megahertz. Ejemplo, el Sprint PCS que emplea la técnica AMDC.

AMDT (Acceso múltiple por división de tiempo)
En esta otra técnica de compartición de canal se asigna a cada usuario celular un intervalo de tiempo que se repite periódicamente en el canal de frecuencia. Como los datos de un determinado usuario aparecen siempre en el mismo intervalo de tiempo del canal, el receptor podrá separar y reconstruir las señales de distintos usuarios.

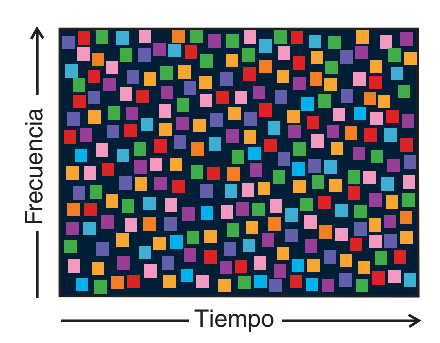
TERCERA GENERACION: DIGITAL EN BANDA ANCHA

(Esperada de aquí a pocos años)
Los operadores inalámbricos han prometido reacondicionar sus redes para el tráfico de datos en banda ancha, a velocidades muy superiores a las de 10 kilobit por segundo que hoy son normales.

EDGE (Velocidades de datos mejoradas para la evolución global)
Con esta mejora las redes basadas en AMDT pueden lograr velocidades de transmisión de hasta 384 kilobit por segundo. Persiguen este objetivo las redes GSM en Europa y la AT&T Wireless en EE.UU.

GPRS (Servicio general de paquetes por radio)
Consiste en mejorar las redes GSM utilizando conmutación de paquetes para las comunicaciones de datos. En vez de enviar los datos por circuitos especializados, la red divide la información en paquetes y los transmite por cualquiera de los canales disponibles.

AMDC-BA (Acceso múltiple por división de código en banda ampliada)
Es un refinamiento de la técnica AMDC capaz de elevar las velocidades de transmisión de datos hasta los dos megabit por segundo. La AMDC-BA esparce los fragmentos de señal inalámbrica sobre una banda de frecuencias mucho más amplia que la utilizada en AMDC.



EL ACCESO MULTIPLE por división de código fracciona cada señal inalámbrica en una multitud de fragmentos de datos (*cuadraditos en color*). Los fragmentos se transmiten esparcidos por una banda de frecuencias y se recomponen luego en el extremo receptor.

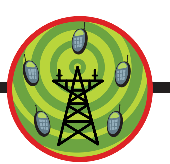
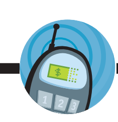
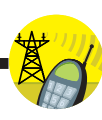
utilizar el teclado y la pantalla? Esto sería factible si el programa lógico del dispositivo fuera capaz de reconocer y sintetizar la voz humana. Microsoft se ha fijado el objetivo de elaborar un sistema operativo apto para atender órdenes orales, y Philips e IBM han emprendido proyectos similares. Lernout & Hauspie, compañía informática belga de reconocimiento de voz, acaba de adquirir dos empresas competidoras, Dragon y Dictaphone, para acelerar sus propios trabajos de desarrollo.

Por desgracia, se ha avanzado con desesperante lentitud en este terreno. Aunque haya mejorado radicalmente la calidad de los programas de dictado —los hay capaces de transcribir exactamente del 95 al 99 por ciento de las palabras dichas—, hasta los más avanzados ordenadores todavía tendrán que luchar con tareas básicas del lenguaje. El problema reside en que el grado de refinamiento de los programas de reconocimiento de voz aún no es suficiente para captar los matices del habla humana [*véase* “Hablar con el ordenador” por Victor Zue; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1999].

Lernout & Hauspie ha desarrollado, sin embargo, una técnica intermedia que permite admitir un limitado número de órdenes orales. El programa se denomina *NAK* (nombre tomado de la palabra hawaiana *nakulu*, “eco”) y está destinado a aparatos móviles que funcionen con los microprocesadores Strong-ARM de Intel, de gran potencia y eficacia energética. Merced a un sintetizador de voz el aparato NAK podría leer en voz alta el texto de un mensaje de correo electrónico, el usuario podría dictar al micrófono su respuesta y enviarla luego mediante una orden oral, por ejemplo, “Mandar correo”. Según la compañía, el NAK tendrá un vocabulario de más de 30.000 palabras, con un extenso repertorio de órdenes posibles, y podrá entender más de un idioma. Se espera producir estos aparatos en serie a principios del año que viene, a precios inferiores a las 100.000 pesetas.

Se percibe ya con claridad que la gama actual de aparatos electrónicos portátiles acabará dando paso a otra nueva generación de móviles que reunirán las funciones de sus predecesores. Habrá verdaderos aparatos digitales de lujo que integrarán el pleno acceso a todos los recursos de Internet, incluidos gráficos, vídeo y música. Otros dispositivos inalámbricos más especializados podrán descargar canciones de Internet. Las funciones de mayor utilidad general —el acceso a la red, probablemente a través de portales personalizados, y el envío de correo electrónico— irán incorporadas en la mayoría de los aparatos portátiles, puesto que ello resulta fácil, económico y conveniente. El teléfono móvil actual muy pronto parecerá tan raro como el monóculo.

FIONA HARVEY, experta en técnicas inalámbricas, se dedica a la divulgación de temas relacionados con la industria de las telecomunicaciones.

Promesas y riesgos del WAP

El Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas (WAP) permite la conexión a Internet de los usuarios de telefonía celular, pero la técnica adolece de graves limitaciones

Karen J. Bannan

Todo viaje inolvidable comienza con un primer paso. La industria de telecomunicaciones parece persuadida de que el primer paso hacia una Internet móvil es la implantación de un conjunto de especificaciones técnicas denominado Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas (*Wireless Application Protocol*, WAP).

En los últimos años hemos visto la introducción de redes de datos por los principales operadores inalámbricos para extraer información de la Telaraña Mundial y mostrarla en las diminutas pantallas de los teléfonos. Las especificaciones WAP normalizarán esencialmente la transmisión de documentos de Internet a teléfonos celulares, buscapersonas y otros aparatos de bolsillo. Los operadores europeos están ya adoptando las normas WAP en sus redes de datos, y algunos operadores en EE.UU. —Sprint PCS y Nextel— prometen adoptarlas en el futuro. Los partidarios del WAP sostienen que esa transición acelerará la expansión de la Internet inalámbrica. Pero los detractores arguyen que las especificaciones WAP son inadecuadas porque limitan gravemente el acceso del usuario a Internet. Todavía no está claro si el WAP anuncia una edad dorada real de la transmisión inalámbrica de datos o resultará ser un comienzo en falso.

El protocolo de aplicaciones inalámbricas proviene de técnicas desarrolladas por Phone.com, empresa informática. El gran obstáculo para el acceso inalámbrico a Internet consiste en que los teléfonos y redes celulares no tienen capacidad suficiente para manejar el lenguaje HTML (*HyperText Markup Language*, lenguaje marcador de hipertexto), la lengua franca de Internet que utilizan los editores de sitios de la misma para ligar texto y gráficos en documentos sencillos y de fácil navegación. En efecto, los teléfonos celulares actuales tienen muy poca anchura de banda y transmiten los datos mucho más despacio que las redes de líneas fijas, lo que dificulta y casi imposibilita la transmisión inalámbrica de imágenes por Internet. Tampoco poseen los móviles de hoy la potencia de procesamiento ni las pantallas necesarias para representar imágenes complejas.

Con el fin de obviar estos problemas los expertos de Phone.com crearon el HDML (*Handheld Device Markup Language*, lenguaje marcador para dispositivos de bolsillo), ideado específicamente para redes inalámbricas. El HDML permite transmitir las partes de texto de las páginas Internet a teléfonos celulares y otros dispositivos móviles. Muchas de las redes inalámbricas de datos de EE.UU. han incorporado el soporte informático de Phone.com a sus teléfonos y servidores de red. Y avanzando un paso más, Phone.com se ha asociado con tres fabricantes de telefonía celular —Motorola, Nokia y Ericsson— para concebir un lenguaje normalizado basado en el HDML. Fruto de ello ha sido el WML (*Wireless Markup Language*, lenguaje marcador para vías inalámbricas), que se convirtió en el núcleo de las especificaciones WAP. Estas empresas formaron además el Foro WAP para promover las nuevas normas, grupo que se ha engrosado hasta más de 530 miembros.

El acceso desde una red WAP a Internet procede a través de los pasos siguientes: el usuario de un teléfono con capacidad de WAP solicita primero cierta página de Internet por medio del microbuscador de su aparato, versión reducida de los programas buscadores que utilizan los ordenadores personales para navegar por dicha red. La petición se cursa por ondas de radio a una estación de transmisión celular, y después se encamina a un servidor explotado por el operador inalámbrico. Este servidor incorpora la cabecera de WAP, programa que actúa como filtro entre la red inalámbrica e Internet. La cabecera localiza la página Internet que ha solicitado el usuario de telefonía celular. Si la página está escrita en HTML (como la mayoría de las páginas de Internet), el programa codificador convierte el documento a WML, despojándolo de gráficos y de cualquier formato de texto especializado, como pueden ser las fuentes de tipos elegantes. La cabecera WAP codifica la traducción en WML para que pueda transmitirse por vía inalámbrica, tras lo cual se envía el documento al teléfono del usuario, donde aparece en la pantallita.

Sin embargo, la conversión de HTML a WML no suele estar libre de obstáculos. Por ejemplo, si una página de

Internet se vale de imágenes para enlazar con otras, habrá que reescribir la página para que los enlaces sean textuales. En la práctica, esta conversión suele limitar el volumen de información accesible y a veces hace enteramente ilegible la página de Internet. Por esta razón muchos editores de Internet han creado por separado versiones en WML de sus páginas, expresamente adaptadas para dispositivos WAP. Los usuarios de WAP hallarán una lista de más de 5000 sitios de fácil tratamiento visitando *www.cellmania.com*. Con ayuda de estos portales, los usuarios de teléfono celular pueden consultar los resultados deportivos, los horarios de vuelos o las últimas adquisiciones de libros de *Amazon.com*.

Pero la gama de servicios e informaciones accesibles a los teléfonos celulares es sólo una pequeña fracción del caudal de datos que atesora Internet. Por eso ciertos expertos creen que las normas WAP pronto se quedarán anticuadas ante los progresos técnicos de la telefonía celular. Según Rich Luhr, de Herschel Shostech, "este protocolo se concibió para las redes celulares de banda estrecha de los años noventa, con teléfonos carentes de capacidades gráficas y pantallas de sólo dos a cuatro líneas de texto". Cuando mejoren las redes y los dispositivos inalámbricos el WAP, declara Luhr, ya no tendrá razón de ser.

Por su parte, las compañías que apoyan ese protocolo sostienen que es posible revisar las especificaciones para acomodarse a técnicas futuras como las de redes de tercera generación hoy en desarrollo. Subrayan, además, que los teléfonos compatibles con WAP no pretenden sustituir a los ordenadores personales equipados con buscadores de Internet. "Su objeto es entregar un contenido único optimizado para dispositivos inalámbricos." Scott Goldman, del Foro WAP, precisa muy bien las diferencias: "No es lo mismo utilizar o alcanzar Internet desde un aparato inalámbrico que desde un PC. Yo digo que acceder a Internet desde un ordenador personal es como acercarse a un buffet surtido de una extensa variedad de manjares. Usted puede elegir y tomar lo que prefiera, pasar con rapidez de una comida a otra y servirse la cantidad que quiera. En cambio, WAP se parece más al servicio de cámara de un hotel: usted selecciona en el menú los platos deseados, los encarga y los recibe en su habitación."

¡Visítelo!
www.wapforum.org
El sitio Foro WAP de Internet detalla las especificaciones técnicas del Protocolo de Aplicaciones Inalámbricas.

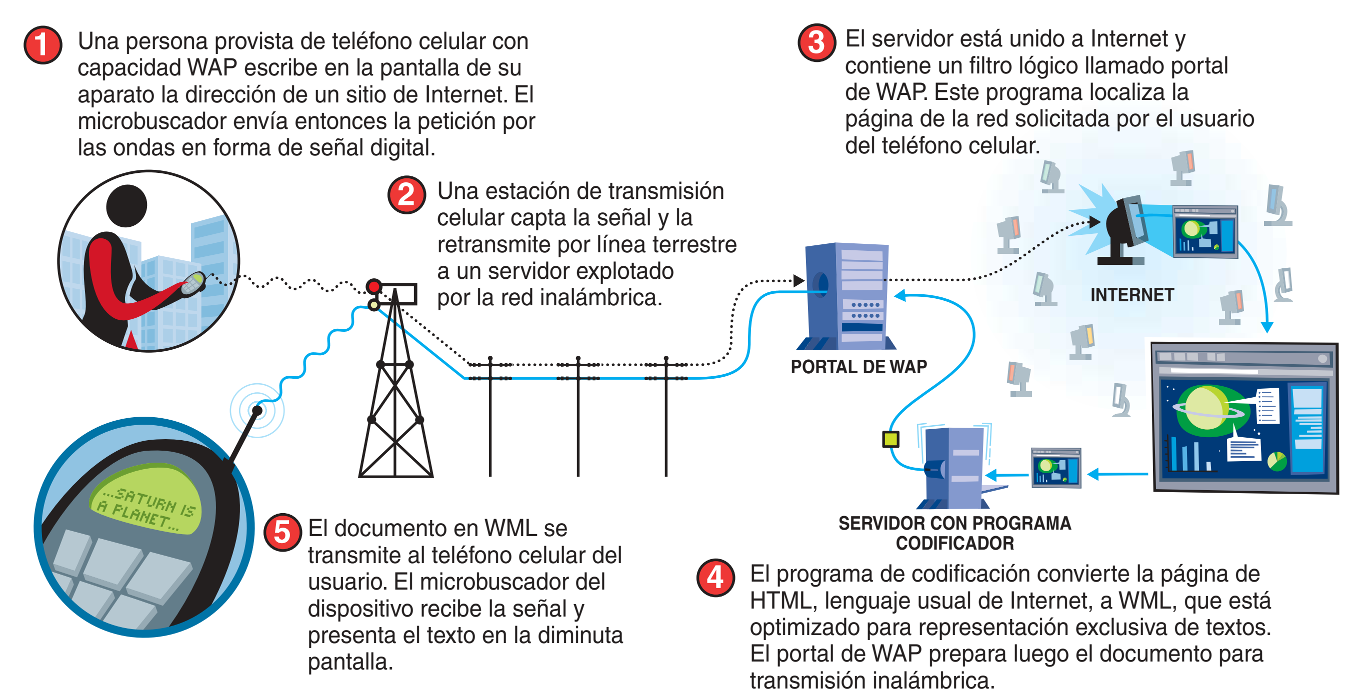
En el Foro WAP se considera prioritario animar a las compañías de Internet a que produzcan nuevos contenidos para teléfonos WAP. Pero en opinión de algunos la creación de una página de Internet compatible con dicho protocolo es más difícil que la composición de una página de Internet típica, por ser el aprendizaje de WML más arduo que el de HTML. Goldman, no obstante, cree que, a medida que el WAP se popularice, predominarán en el desarrollo de WML herramientas similares a las utilizadas para HTML. Aun así, las dudas sobre el futuro del WAP han hecho recelar a muchos editores de Internet: no quieren invertir en la creación de páginas separadas para teléfonos celulares si las normas van a quedarse pronto viejas. "Nadie quiere lanzarse ni comprometerse a nada hasta que la situación no se estabilice", dice Herb Williams, de Spyglass. "Hay opiniones muy negativas sobre el WAP y esto limita el volumen de los contenidos disponibles."

El punto flaco del WAP

Otra barrera que ha de superar el WAP es la seguridad. La versión actual de las normas incluye una serie de disposiciones bajo la denominación WTLS (*Wireless Transport Layer Security*, seguridad de la capa de transporte inalámbrico), que especifican cómo encriptar los datos inalámbricos durante su tránsito desde el teléfono celular hasta el operador de la red. Las técnicas WTLS

Acceso a Internet mediante el protocolo WAP

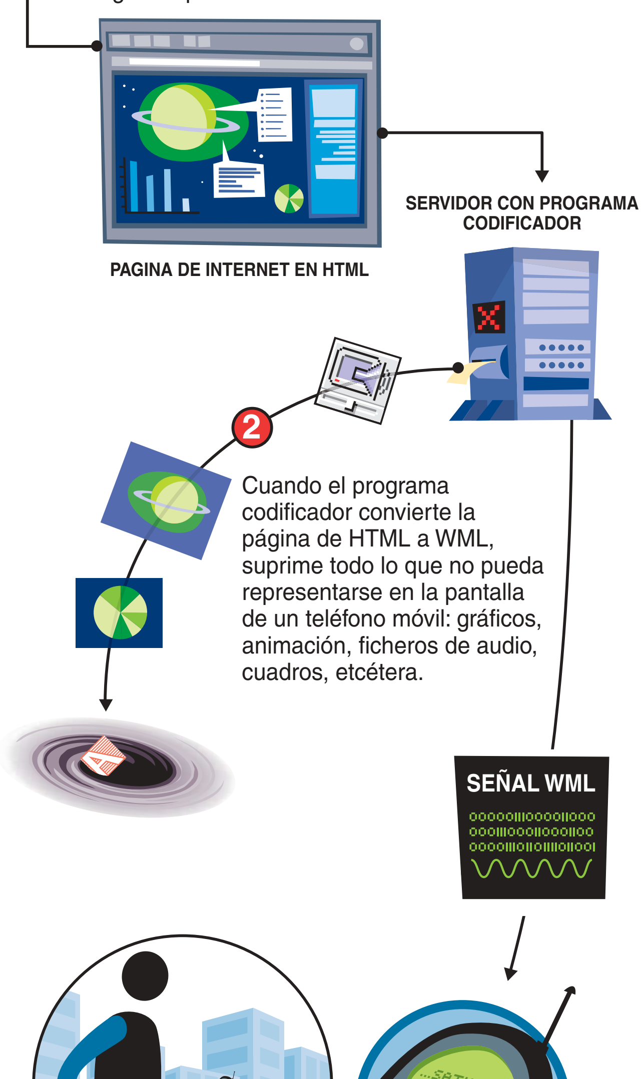
El protocolo de aplicaciones inalámbricas es un conjunto de normas que especifican cómo pueden acceder los usuarios a la Telaraña Mundial.



Lo perdido en la traducción

Las redes WAP tienen que expurgar las páginas de Internet para adecuar su contenido a las minúsculas pantallas de los aparatos inalámbricos.

1 En una página de Internet escrita en HTML puede haber texto, gráficos, animaciones y ficheros de audio. A menudo se utilizan imágenes como enlaces con otras páginas y el texto puede presentarse con elegantes fuentes de tipos. También es posible descomponer la página en cuadros que faciliten la navegación por el sitio.



Recibido el documento WML por el teléfono celular, el texto de la página de Internet se muestra en la pantalla del aparato. Las palabras se presentan en una fuente estándar, y los enlaces por imagen de la página pasan a ser por texto.

son menos exigentes en potencia y memoria que la técnica SSL (*Secure Sockets Layer*, capa de zócalos seguros) utilizada para proteger los números de las tarjetas de crédito y otras informaciones confidenciales en Internet. El punto débil del sistema, sin embargo, es el servidor que ejecuta el programa cabecera de WAP, en el cual los datos se han de desencriptar de la codificación inalámbrica y encriptarse nuevamente en código Internet. Durante una fracción de segundo (el tiempo exacto depende de la latencia y la velocidad de la red) la información privada del usuario de telefonía celular queda sin encriptar. Por supuesto, este momento de vulnerabilidad ocurre en servidores estrechamente protegidos por los operadores inalámbricos. Pero los críticos insisten en que incluso un lapso tan breve supone un riesgo excesivo.

Por si no hubiera bastantes problemas, un litigio sobre patentes ensombrece también las perspectivas del WAP. La empresa Geoworks, que desarrolla informática para comunicaciones inalámbricas, es titular de una patente para el interfaz de usuario incorporado en los teléfonos WAP y está buscando cobrar unos derechos de unos cuatro millones de pesetas anuales de toda compañía importante que utilice esta técnica. El pasado abril Phone.com presentó una demanda contra Geoworks, alegando la invalidez de la patente. Dos meses más tarde Geoworks se querelló en sentido opuesto, sosteniendo que las actividades de Phone.com infringían su patente. Aunque esto parezca una mera confrontación entre compañías rivales, los procesos legales y la incertidumbre sobre los derechos de patente pueden tener un efecto paralizador.

Por otra parte, Internet no es el único pasatiempo existente. Ciertas redes inalámbricas estadounidenses pueden decidir continuar con sus microbuscadores y cabeceras en HDML en vez de cambiar a los programas normalizados del WAP. No hay grandes diferencias técnicas entre WAP y HDML. El WAP tiene la ventaja de ser una norma abierta, no un sistema de uso exclusivo; el operador de una red WAP puede comprar sus microbuscadores y cabeceras a una serie de suministradores, ya no sólo a Phone.com. El paso de HDML a WAP tiene, sin embargo, un coste: el operador deberá reemplazar todo equipo que no sea compatible con las normas WAP, empezando por los teléfonos celulares antiguos que solamente funcionan con HDML.

Pero la gran pregunta es si los usuarios inalámbricos utilizarán realmente los servicios que presta el WAP. Numerosos observadores creen que las redes WAP no se popularizarán hasta que los operadores inalámbricos no ofrezcan los servicios de datos al mismo precio que los servicios de voz. Los contenidos de WAP deben servir de punto de apoyo para atraer y retener usuarios de voz.

El futuro del WAP puede, en último término, depender de la actitud de sus promotores. Las redes inalámbricas actuales no son tan abiertas como Internet; los operadores y fabricantes de equipo controlan en gran medida la clase de datos a que tienen acceso sus teléfonos. Y es cierto que el explosivo crecimiento de Internet fue resultado directo de su apertura. El medio llegó a ser tan popular porque cualquier empresa podía crear su propio sitio en Internet con muy poco esfuerzo y un mínimo gasto. Son muchos los que creen que las redes inalámbricas de datos han de seguir este modelo para alcanzar el éxito.

KAREN J. BANNAN es colaboradora asidua de New York Times, Wall Street Journal, Internet World *y* PC World, *entre otras publicaciones.*

Atribución del espectro radioeléctrico en España

EN LA MISMA LONGITUD DE ONDA

Tanto las ondas de radio como las de luz consisten en unos campos eléctricos y magnéticos que se propagan por el espacio. Se distinguen unas de otras —así como los otros tipos de ondas electromagnéticas— precisamente por las técnicas de detección. El ojo humano es sensible a ondas de frecuencias, longitudes de onda y niveles de energía medianos. Pero una antena de radio capta ondas de frecuencia mucho más baja, mayor longitud de onda y más débil energía. Por conveniencia, las ondas de radio se miden por su frecuencia (hertz), mientras que otras clases de onda se identifican por su longitud de onda (metros) o su energía (electronvolt).

En España, la distribución del espectro radioeléctrico es competencia del Estado y la ejerce la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones (Ministerio de Ciencia y Tecnología). El cuadro presenta sólo los principales usos (atribuciones), pero casi todo el resto del espectro está también ocupado, por lo cual las atribuciones de bandas se hacen a frecuencias cada vez más elevadas.

Los servicios inalámbricos de alta velocidad con acceso a la Red se prestarán en frecuencias del orden de 2 GHz, de acuerdo con los planes establecidos para el sistema UMTS (sistema telefónico móvil universal). En EE.UU. todavía se mantiene la incertidumbre sobre la banda de frecuencias destinada a tales servicios.

10 kHz — 30 km
100 kHz — 3 km
1 MHz — 300 m
10 MHz — 30 m
100 MHz — 3 m
1 GHz — 30 cm
10 GHz — 3 cm
100 GHz — 3 mm
1 THz — 300 μm
30 μm
3 μm
300 nm
40 eV — 30 nm
400 eV — 3 nm
4 keV
40 keV
400 keV
4 MeV

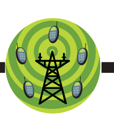
Espectro radioeléctrico (por debajo de 300 GHz)
Ondas submilimétricas 100 μm–1 mm
Infrarrojo 780 nm–100 μm
Visible 380–780 nm
Ultravioleta 10 nm–380 nm
Rayos X 120 eV–120 keV
Rayos gamma (por encima de 120 keV)

100 kHz
Ondas largas
Ondas medias
1 MHz
Ondas cortas
10 MHz
VHF
100 MHz
UHF
1 GHz
Microondas
10 GHz

Radiodifusión en AM 526,5–1606, 5 kHz
Bandas de radiodifusión en onda corta
Banda ciudadana de radio 27 MHz
Aplicaciones industriales, científicas y médicas 22, 27, 40
Teléfonos sin cordón 31,05–40,22
Televisión en VHF 47–68
Radio en FM 87,5–108
Aeronáutica 122–130
Radioaficionados 135–138
Televisión en VHF 174–223
Meteorología 400–406
Telemedida, telemando 433–435
Televisión en VHF 470–790 MHz, 790–830, 830–862
Telefonía celular (GSM) 880–905 MHz, 925–950
Investigación espacial 5850–7450
1 GHz
Radioaficionados 1215–1260
Radiodifusión digital 1452–1492 MHz
Sistema de posicionamiento global (GPS) 1559–1610
Telecoms. digitales europeas sin cordón (DECT) 1880–1900
Sistema móvil universal (UMTS) (3G) 1900–1980, 2010–2025, 2110–2170

- Ondas largas
- Ondas medias
- Ondas cortas
- Ondas métricas (VHF)
- Ondas decimétricas (UHF)
- Microondas

Datos tomados del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF).



El futuro ha llegado. ¿O tal vez no?

¿Podrán nunca popularizarse los teléfonos móviles de la Red con el tiempo y el dinero que cuesta enviar un correo electrónico?

David Wilson

Para entrever el futuro, observemos a un adolescente japonés. La llamada por teléfono móvil —verdadero fenómeno de la vida moderna— terminará como los discos de vinilo de 45 rpm. El teléfono no sólo sirve para llamar, sino que ha de enviar correo electrónico. Desde su introducción en febrero de 1999 unos diez millones de japoneses se han equipado con el teléfono iMode, capaz de acceder a Internet. Tanta ha sido su popularidad, que el operador, DoCoMo de NTT, es ahora el primer proveedor de servicios de Internet.

La aceptación de los teléfonos de la Red en EE.UU. crece con bastante mayor lentitud. Las empresas de telefonía celular han incorporado "microbuscadores" a sus modelos más recientes, de suerte que los usuarios puedan enviar correo electrónico y leer los titulares de las noticias. Los tecnófilos que emplean teléfonos de la Red creen en ellos ciegamente. Cuando Edward Learned, director de marketing de un importante proveedor de Internet en Minneapolis, se extravía, sólo tiene que introducir su lugar de destino y el teléfono le da instrucciones. Mientras él se mantiene en línea, revisa su correo electrónico, lee las cotizaciones de bolsa, consulta los horarios de películas y va siguiendo los asuntos pendientes.

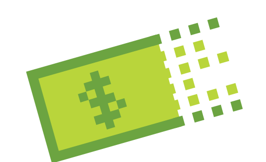
Pero todavía no es seguro que los teléfonos de la Red se reciban en otros países con el entusiasmo de japoneses y escandinavos. Las opiniones respecto a la viabilidad a largo plazo del WAP (protocolo de aplicaciones inalámbricas) están muy divididas. El envío de mensajes electrónicos mediante el teclado del teléfono es ya una realidad, y los aparatos modernos incorporan facilidades tales como predecir la palabra que se intenta escribir, pero el proceso sigue siendo mucho más lento que con un teclado completo. Y lo que es peor, los usuarios pronto caen en la cuenta de que las pantallas pequeñas y los servicios insuficientes son fuente de grandes fallos. Entre las expectativas ofrecidas y las posibilidades actuales se abre un abismo.

Una Red tan grande y un teléfono tan pequeño

Para muchos usuarios, el primer obstáculo es sencillamente el poder navegar por un sitio de la Red en la minúscula pantalla de un teléfono móvil. Podemos comprobarlo si intentamos simular, en nuestro PC, la experiencia del teléfono de la Red. Por supuesto, la información a que puede acceder este teléfono no es sino una gota dentro del inmenso mar que encierra Internet. Los sitios que más se frecuentan desde un PC desbordarán un teléfono celular.

Para que sean utilizables, los sitios han de estar especialmente preparados. Aunque algunas compañías han desarrollado técnicas para convertir directamente una página normal de la Red en una página apta para teléfono de la Red, en la mayoría de los casos se prefiere crear una especie de sitio paralelo al cual puedan acceder los usuarios de este tipo de teléfonos. El número de tales sitios aumenta cada semana. Pinpoint.com, de Durham, opera una herramienta de búsqueda en Internet que rastrea y localiza páginas adecuadas para teléfono: el pasado abril encontró 150.000, y en junio 2,4 millones. Jud Bowman, presidente de la compañía, estima que 25.000 de los cinco millones de dominios de Internet —cada uno de los cuales corresponde a un sitio individual de la Red— ofrecen páginas optimizadas para teléfono. En su inmensa mayoría radican en Europa y Japón.

En resumen, un teléfono de la Red no puede utilizarse como buscador de uso general, sino para conseguir retazos de información de ciertos sitios como MapQuest o Amazon. Casi todos los operadores limitan el acceso de sus clientes a un pequeño subconjunto de páginas de la Red optimizadas para teléfono. Para muchos usuarios esto es suficiente. Los que deseen pantallas ma-



¡Visítelo! www.gelon.net/#wapalizer

En este sitio verá lo que parece la Red desde un teléfono celular.

yores, más cómoda introducción de textos y un acceso más general, a costa de transportar un dispositivo adicional, pueden recurrir a ordenadores portátiles o de bolsillo. El modelo Palm VII viene equipado con acceso inalámbrico a Internet, y es posible agregar módems por radio como el Minstrel de OmniSky a otros dispositivos de bolsillo. Para ordenadores portátiles, Metricom acaba de lanzar una nueva versión de su módem inalámbrico Ricochet, que promete duplicar las velocidades de los mejores módems ordinarios y multiplicar por ocho las de los módems de telefonía celular.

Pero hasta los más pacientes usuarios de los comienzos se ven frustrados por las discontinuidades de cobertura, la lentitud de operación y los largos tiempos de latencia. En muchas zonas, incluso, el servicio se ha deteriorado en el transcurso del tiempo. Algunos de los servicios establecidos no son resistentes, ni admiten redimensión. Funcionan muy bien para unas docenas de personas, pero cuando hay cientos de usuarios, fallan o trabajan muy despacio. También las redes de la tercera generación, tan pregonadas, pueden incurrir en tales dificultades.

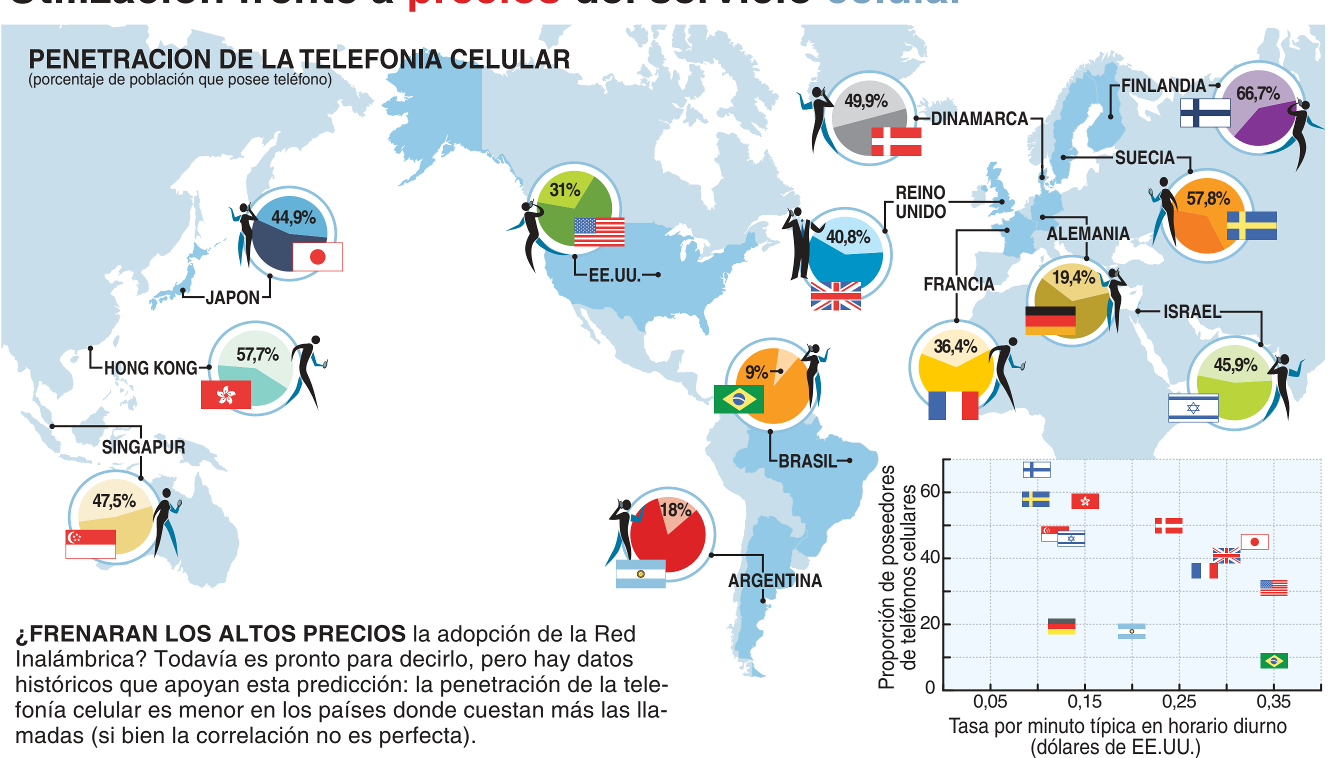
Cuando los retrasos son frecuentes, el desequilibrio entre el coste y la capacidad llega a ser sumamente irritante. Los operadores estadounidenses cobran hasta 39 centavos de dólar (unas 70 pesetas) por minuto, tarifas similares a las que rigen en Europa. El reloj sigue corriendo aunque nos agarrote un calambre o la Red universal se convierta en una espera también universal. Sorprende la facilidad con que se pierde el rastro del dinero gastado. Aunque algunos operadores se disponen a ofrecer tarifas planas, éstas tienden a ser más altas que las del equivalente acceso a Internet por línea telefónica ordinaria.

El sistema de tarifas en Japón no es tan punitivo. Una llamada breve por teléfono celular cuesta unas 36 pesetas. El operador DoCoMo de NTT tiene otras formas de ganar dinero. Así, estiman que el usuario medio de iMode gasta en torno a 2400 pesetas al mes en servicios relacionados con Internet, aparte de su factura telefónica ordinaria. El servicio más popular es la descarga mensual de viñetas de una compañía llamada Bandai. Estos ficheros de dibujos se cobran a 200 pesetas cada uno y se utilizan como protectores de pantalla.

Lo más probable es que la industria esté pasando los dolores de la primera dentición. Las empresas de todo el mundo son conscientes de las posibilidades de esta técnica; los clientes conectados vendrán a ser grandes carteras móviles. El plan consiste en utilizar el teléfono para gastar dinero en todas partes, durante todo el tiempo. ¿Quiere subir en ascensor oyendo su canción preferida? Sólo tiene que desenfundar el teléfono y encargar el álbum. ¿Ha encontrado el jersey perfecto pero duda sobre su precio? Por medio del teléfono puede averiguar si hay una oferta mejor en la tienda de enfrente o en Internet. Sin embargo, mientras las compañías de telefonía celular no coordinen su acción, este sueño no llegará a realizarse.

DAVID WILSON viene ocupándose de Internet desde 1991.

Utilización frente a precios del servicio celular



¿FRENARAN LOS ALTOS PRECIOS la adopción de la Red Inalámbrica? Todavía es pronto para decirlo, pero hay datos históricos que apoyan esta predicción: la penetración de la telefonía celular es menor en los países donde cuestan más las llamadas (si bien la correlación no es perfecta).






El salto de la tercera generación

Toda revolución exige un plan. ¿Qué técnica lo proporcionará?

Leander Kahney

Sólo hay que esperar a que las redes de telefonía celular funcionen a alta velocidad. Y ello será cuando los operadores de Japón comiencen a explotar los sistemas inalámbricos de telefonía celular llamados de la tercera generación (3G). Avanzando de este a oeste, estas redes ágiles deberán llegar en 2002 a Europa y en 2003 a EE.UU. A diferencia de las dos generaciones anteriores de redes celulares, los sistemas 3G han sido concebidos para transmitir/recibir datos y voz. Los operadores prometen descargas que se acerquen a los 2,4 megabit por segundo (Mbit/s), a doble velocidad que los servicios de banda ancha por línea y con rapidez suficiente para bombardear teléfonos móviles, ordenadores de bolsillo y portátiles con vídeo, música y juegos.

Eso es lo que dicen, al menos. Pero cada vez hay más voces advirtiendo que estos sistemas no van a cumplir todo lo que pregonan.

El término 3G no designa una norma o técnica en particular, sino que engloba toda una variedad de métodos para traer los servicios de alta velocidad de Internet a las redes de telefonía celular. En la mayoría de los casos, la tercera generación será resultado de mejorar y actualizar los sistemas actuales, que difieren de un continente a otro y de país a país. Lo más frecuente será comenzar como redes híbridas, en las que se van añadiendo nuevas capacidades a medida que lo exige la demanda.

Resulta de ahí una verdadera sopa de letras. En general, Europa y Asia se convertirán del GSM (norma global para comunicaciones móviles cuya adopción generalizada les ha dado el liderato en técnicas inalámbricas) al AMDC-BA (acceso múltiple por división de código en banda ampliada). En Norteamérica las redes AMDC (acceso múltiple por división de código), tales como las de Sprint y GTE, pasarán también a ser AMDC-BA. Pero los sistemas AMDT (acceso múltiple por división de tiempo), como son los de AT&T y Southwestern Bell, pretenden convertirse al EDGE (velocidades de datos mejoradas para la evolución global).

La mayoría de estos sistemas se encuentran todavía en fase experimental, con sus ventajas y desventajas respectivas. El EDGE requiere mejoras de infraestructura relativamente pequeñas, pero su velocidad de datos máxima (en teoría, 384 kbit/s) no resiste la comparación con los 2 Mbit/s del AMDC-BA, mucho más rápido.

Tanto el AMDC-BA como el AMDC se basan en la técnica llamada de espectro ensanchado. Las técnicas celulares más antiguas, como las GSM y AMDT, utilizan una variante de la solución adoptada por las estaciones de radio ordinarias: la división del espectro radioeléctrico en estrechas bandas de frecuencias. A fin de aumentar la capacidad, estas redes pueden intercalar varias llamadas telefónicas en cada canal de frecuencia, pero hay un límite estricto en cuanto al número de usuarios que pueden compartir el canal sin que se deteriore la calidad de la señal. En cambio, el AMDC asigna a cada llamada un código particular, con lo cual múltiples señales radioeléctricas podrán compartir una gama bastante amplia de radiofrecuencias. Cada teléfono captará las transmisiones destinadas a él mediante reconocimiento de su código. En algunas versiones del espectro ensanchado, el transmisor y el receptor brincan de una frecuencia a otra en un orden preestablecido.

Aunque el rendimiento de los sistemas de espectro ensanchado descienda algo —la tara que conlleva el determinar qué mensajes van a cada teléfono hace que utilicen mucha más anchura de banda que las señales solas—, tienen una gran tolerancia al ruido y son difíciles de interceptar o interferir. El AMDC emplea canales de 1,25 MHz de anchura en las bandas de 800 MHz o de 1,9 GHz. Los canales de AMDC-BA son de 5, 10, 15 o 20 MHz de anchura y se distribuyen por varias bandas situadas en torno a los 2 GHz, lo que permite velocidades de datos más elevadas y mayor número de usuarios.

Por las nubes

Sin embargo, éstas no son las únicas técnicas disponibles, ni siquiera las mejores. Uno de los más rotundos detractores es Martin Cooper, a quien suele atribuirse la invención del teléfono celular para Motorola hace 27 años. Las redes de la tercera generación, sostiene, ofrecerán poco más de 1 Mbit/s si se tiene en cuenta toda la tara asociada. Pero no se trata de 1 Mbit/s para cada usuario; la anchura de banda estará compartida entre todos en una determinada célula (la zona cubierta por una sola estación emisora), con lo que podría haber docenas de personas a la vez en cada canal. Cooper afirma que los usuarios pueden darse por satisfechos si operan a 64 kbit/s en las redes de ter-

AZUL EN COLMILLOS Y GARRAS

AL FIN SE HA ENCONTRADO UN MODO DE DESEMBARAZARSE DE LOS CABLES.

Harald Bluetooth ("colmillo azul") se llamaba el fiero rey vikingo que unió Dinamarca y Noruega por la fuerza de las armas en el siglo x. Ha tomado su nombre: un sistema inalámbrico de corto alcance que presagia el final, largamente esperado, de los hilos y cables de los ordenadores.

Bluetooth es un "conductor inalámbrico" que permite la conexión sin cables de ordenadores y dispositivos de telecomunicación. Originalmente se aplicó al diseño de cascos inalámbricos para teléfonos celulares, pero rápidamente fue adoptado por toda la industria electrónica. Aunque es ahora cuando aparecen los primeros dispositivos *Bluetooth*, el principio se ha convertido ya en norma fáctica: más de 1000 fabricantes se han comprometido a producir aparatos con capacidad *Bluetooth*, desde ordenadores portátiles y teléfonos móviles hasta juguetes y neveras.



La técnica permite un alcance máximo de unos 10 metros y opera en la banda ICM (industrial-científica-médica) de 2,4-2,5 gigahertz, en la cual se permite funcionar a transmisores de baja potencia sin necesidad de previa licencia del gobierno. Para evitar la interferencia con otros dispositivos, *Bluetooth* salta de unas frecuencias a otras a un ritmo de 1600 veces por segundo.

Además de reemplazar los cables, *Bluetooth* facilitará el establecimiento de redes inalámbricas en el hogar o la oficina, y en lugares públicos como aeropuertos y bibliotecas. Permitirá, asimismo, que distintos dispositivos intercambien información siempre dentro del margen de alcance, pudiendo los asistentes a una conferencia negociar con tarjetas de la empresa o sincronizar sus organizadores portátiles los empleados cuando entran en la oficina. Muchos teléfonos celulares, ordenadores de bolsillo y portátiles poseen puertos de infrarrojos para estos fines, pero su alcance suele estar limitado a un metro más o menos.

En el sector industrial se espera que Bluetooth se popularice, pero su índice de adopción dependerá de la frecuencia con que se renueven los aparatos electrónicos.

---

cera generación. Pese a ofrecer una clara mejora sobre las redes inalámbricas actuales, esta velocidad sólo será ligeramente superior a la de un módem ordinario y apenas podrá justificar todas las cualidades que se pretende atribuir a las nuevas redes. Cooper considera que la red de tercera generación es un paso infantil hacia las genuinas comunicaciones inalámbricas económicas y rápidas. Actualmente trabaja en ArrayComm en el desarrollo de "antenas inteligentes" capaces de proporcionar 1 Mbit/s a cada uno de los usuarios simultáneos de un grupo máximo de 40. El sistema aprovecha mejor las redes de antenas que existen en las estaciones de base celulares. Cada estación contiene un grupo de hasta doce antenas, que se utilizan en radiación omnidireccional, esto es, con igual intensidad en todas las direcciones.

Pero gran número de sistemas de comunicaciones y radar emplean redes de antena similares para apuntar las señales a direcciones concretas. Las interacciones entre las transmisiones de antenas individuales impiden la propagación de señales en ciertas direcciones y en otras la favorecen. Cooper propone la modificación de las estaciones de base para cumplir esta misma finalidad.

Su sistema se basa en los procesadores de señales digitales originalmente desarrollados para el espionaje de transmisiones de radiodifusión. Agregados a una red de antenas, estos procesadores pueden dirigir con precisión las señales radioeléctricas a usuarios individuales. Al moverse cada usuario, las antenas inteligentes lo van siguiendo. De ahí resulta una especie de nube de señales radioeléctricas que va rodeando al usuario en su trayecto. El sistema puede reutilizar las mismas radiofrecuencias para usuarios diferentes en situación de proximidad, sin preocuparse de que las transmisiones se interfieran entre sí. El resultado es una utilización muy eficaz del espectro asignado al operador, que tolera velocidades de datos elevadas.

Las antenas están ya instaladas, y la mayoría de las estaciones de base incorporan procesadores de señales

Normal y por red







¡Visítelo!
www.avren.com/Courses/TX_RX_Architectures_plain.htm

En este sitio encontrará información sobre cómo funciona la radio.

con la potencia de procesamiento necesaria. Así pues, sólo se requiere una mejora del programa soporte para convertirlas en antenas inteligentes. El inconveniente es que las altas velocidades de datos se obtienen a costa de reducir el movimiento. Aunque el sistema es capaz de seguir a una persona que camina, actualmente no puede hacerlo con un vehículo rápido. ArrayComm proyecta iniciar en breve las pruebas a gran escala y ha formado equipo con Sony para suministrar vídeo, música y juegos por vía radio en San Diego.

Radicalmente diferente es el camino seguido por el inventor Larry W. Fullerton, que ha dedicado veinte años de trabajo oscuro a una técnica potencialmente revolucionaria: la UWB (banda ultra-ancha). La mayoría de las transmisiones por radio constan de dos componentes: onda portadora y señal. La onda portadora es el vehículo, y a esa frecuencia se sintoniza el radiorreceptor. La señal viene a ser el pasajero que procede de un micrófono, cámara de televisión o conexión de Internet, y se imprime sobre la portadora mediante el proceso de modulación. El tipo de modulación más corriente, la FM (modulación de frecuencia), hace que la portadora se ensanche en una cantidad que se aproxima a la velocidad de datos de la señal. Así, un mensaje transmitido a 10.000 bit/s hace que la portadora se "corra" 10 kHz por cada lado. Esto explica que las estaciones de radio hayan de estar separadas en frecuencia.

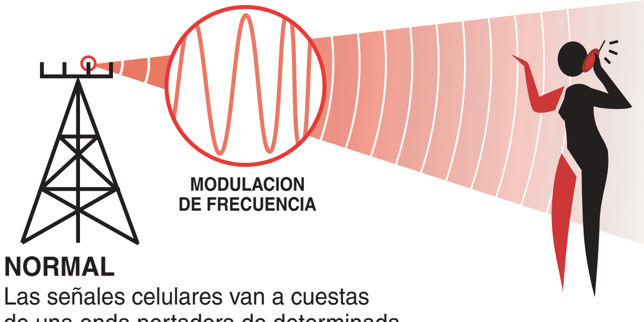
La técnica de espectro ensanchado, utilizada en las redes celulares más avanzadas de este momento, básicamente conmuta entre muchas portadoras diferentes para una misma transmisión. Pero la UWB prescinde totalmente de la portadora: es puramente una señal. En esencia, se agrega a la antena un conmutador que cierra y abre cuando hay o no hay señal, produciendo un impulso de energía electromagnética cuyo efecto viene a ser como el chasquido que se oye en la radio al encender una luz. En los sistemas de Fullerton, los impulsos duran menos de un nanosegundo (10^{-9} segundos) cada uno y ocurren hasta 40 millones de veces por segundo. A la manera de un código Morse ultrarrápido, los impulsos aparecen en una configuración muy particular, capaz de encerrar en código la información deseada.

La UWB implica algo que parece descabellado. En vez de operar en una pequeña parte del espectro radioeléctrico como otras técnicas, lo hace en una región muy amplia: típicamente los impulsos transportan energía desde 1 GHz a 3 GHz. Afortunadamente esto no perturba a otros sistemas de radio. La mayoría de los receptores percibirán las señales UWB como fenómenos estáticos aleatorios, susceptibles de filtrarse si se mantienen en un bajo nivel de potencia. Solamente pueden reconocer y decodificar las señales los receptores que conozcan la configuración de impulsos. Diferentes transmisores de UWB pueden utilizar configuraciones distintas, con lo cual pueden funcionar muchos a la vez sin interferirse mutuamente.

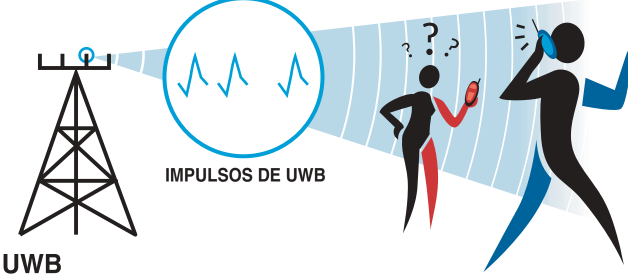
Fullerton es hoy director técnico de la empresa Time Domain, creada para comercializar UWB. La compañía espera elevar todavía más las velocidades de transmisión de datos: ¿un gigabit por segundo? Hasta la primavera pasada la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) sólo había autorizado la UWB para ensayos limitados, pero en mayo dio vía libre para unas pruebas mucho más amplias.

La UWB ofrece una gran variedad de aplicaciones posibles, desde sistemas de radar personales para detectar colisiones hasta dispositivos de formación de imágenes capaces de ver a través de las paredes. Pero, ¿podrá algún día proporcionar comunicaciones inalámbricas de gran anchura de banda? Se tropieza ahí con un grave inconveniente: para que las señales no interfieran a otras emisiones radioeléctricas, la UWB ha de radiar con potencias extremadamente bajas, del orden de 50 millonésimas de watt; en consecuencia, el alcance queda reducido a muy pocos metros. Con más potencia, el alcance sería mayor, pero aumentaría el riesgo de interferencia con radios, televisores y receptores del sistema GPS (posicionamiento global por satélite). La UWB se limitará inicialmente a redes de área local interiores, a semejanza de la red *Bluetooth*, pero algún día podrá emplearse en redes vecinales.

Normal y UWB



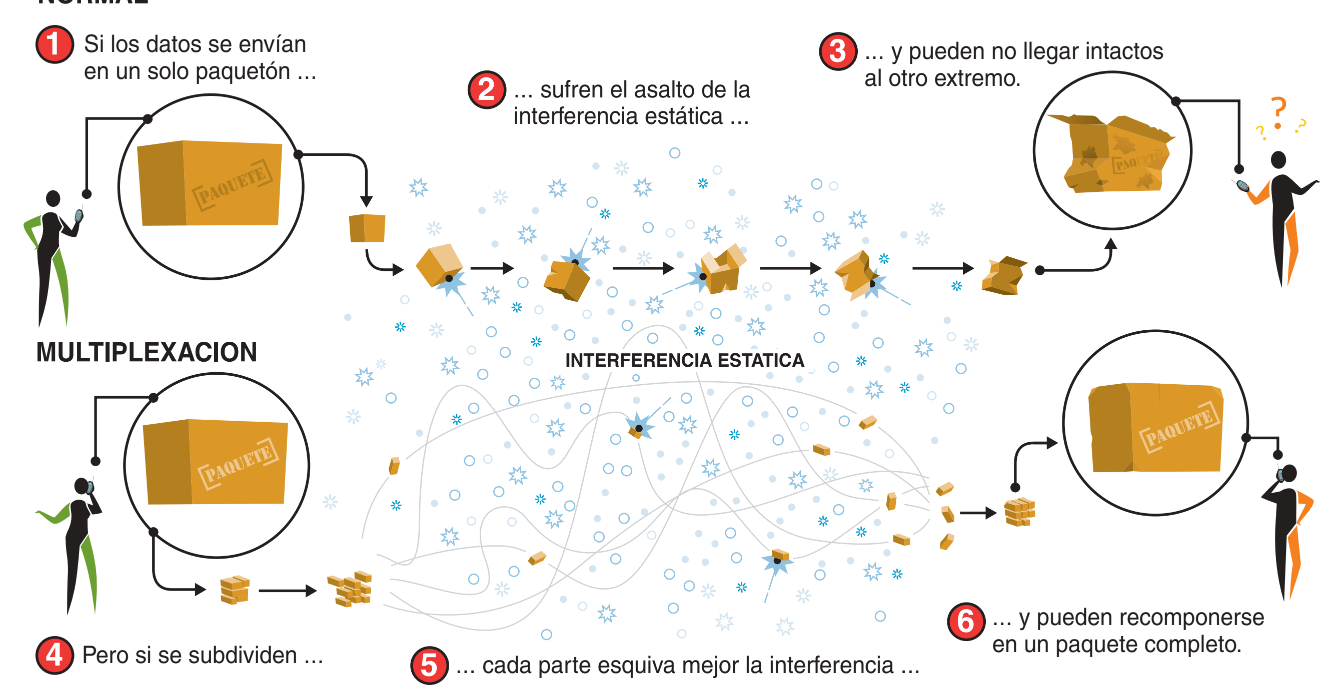
NORMAL
Las señales celulares van a cuestas de una onda portadora de determinada frecuencia.



UWB
La señal va codificada en una secuencia predeterminada de pequeños impulsos. Los no usuarios los perciben como ruido y por tanto no hacen caso.

Canales múltiples

Una tercera solución posible es la técnica de multiplexación, que en una u otra forma se utiliza desde los años cincuenta. Consiste en transmitir varias señales por un mismo canal. Es de uso común en la transmisión por fibra óptica: un gran paquete de datos se



fragmenta en bloques menores, transmitidos simultáneamente por distintas longitudes de onda ópticas y recompuestos en el otro extremo. Para un sistema inalámbrico se aplica exactamente el mismo principio, pero en longitudes de onda pertenecientes a la sección radioeléctrica del espectro electromagnético.

Hasta la fecha no se ha explotado la multiplexación radioeléctrica para los sistemas celulares porque no existían procesadores de señal digitales suficientemente rápidos para rastrear y combinar las diferentes señales. La situación puede cambiar muy pronto. Una compañía canadiense, Wi-LAN, es titular de varias patentes esenciales para la técnica de multiplexación por división ortogonal de frecuencia en banda ampliada (W-OFDM).

Según Hatim Zaghloul, su director general, la W-OFDM permite transmitir datos a velocidades muy altas a través de un limitado intervalo del espectro radioeléctrico, aproximadamente de 10 MHz, en las bandas exentas de licencia que se destinan a aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM) en 900 MHz, 2,4 GHz y 5 GHz. Los 10 MHz se subdividen en 10 canales separados uniformemente, cada uno de los cuales es capaz de transportar datos a 1 Mbit/s.

¿Y todo eso para qué?, cabe preguntar. Al fin y al cabo, esos 10 MHz podrían agruparse en un solo canal de 10 Mbit/s. La multiplexación no consigue nada gratuito: un tren de datos de alta velocidad puede dividirse en varios trenes de baja velocidad, pero la capacidad total del espectro radioeléctrico, fijada por las leyes de la física, seguirá siendo la misma.

El quid de la cuestión está en que las señales rápidas se degradan con más facilidad por el ruido, la interferencia y los llamados efectos multitrayecto, causados por reflexiones de las señales de radio en edificios u otros accidentes del terreno. Por otra parte, las señales de baja velocidad se escabullen mejor de los estáticos. En consecuencia, al subdividir el espectro, la W-OFDM consigue utilizarlo con mayor eficacia.

En una configuración Wi-LAN ha conseguido 32 Mbit/s. En unas pruebas realizadas en este mismo año, se ha logrado radiar señales de vídeo a un coche que circulaba a 110 kilómetros por hora. Zaghloul espera alcanzar la fantástica velocidad de 155 Mbit/s a final de 2001, dado que los procesadores de señales mejorados admiten un mayor número de canales. La técnica podría aplicarse a sistemas inalámbricos fijos a principios del año que viene, y a los sistemas móviles hacia el 2003. La cruz de la moneda es que el W-OFDM exigirá una remodelación apreciable de las redes celulares actuales. Su adopción quizá tenga que demorarse hasta que los operadores dejen atrás los sistemas de la tercera generación y afronten una nueva —cuarta— generación.

Con tantas técnicas en juego —espectro ensanchado, redes de antena, UWB, multiplexación y otras—, muchos expertos están cayendo en la cuenta de que el mayor obstáculo para unas comunicaciones inalámbricas rápidas no está en la ingeniería sino en el modelo de actividad. ¿Qué recursos quieren los operadores incorporar a sus sistemas? ¿Qué compromisos aceptarán entre la anchura de banda disponible y el número de usuarios obligados a compartirla?

Cooper señala que la industria inalámbrica está hoy dominada por monopolios de telecomunicaciones con la mentalidad de imponer una red válida para todos. En vez de ello, proclama, le gustaría ver una multitud de redes diferentes para distintas finalidades. Predice que las redes vocales de ámbito nacional coexistirán con redes de datos locales, y que las redes económicas de baja velocidad se codearán con redes de alta velocidad más costosas. Y en cuanto a la velocidad, Cooper asegura que las redes inalámbricas terminarán por ofrecer prestaciones equivalentes a las de las redes alámbricas.

LEANDER KAHNEY es redactor de Wired News.

Shawn Carlson

Balanza de alta precisión

Comparto con mis mejores amigos una entusiasta afición por los instrumentos y por hallar soluciones baratas a las dificultades experimentales. Ese interés común desemboca en amistosas rivalidades, cuyos resultados suelen ser pasto de esta sección.

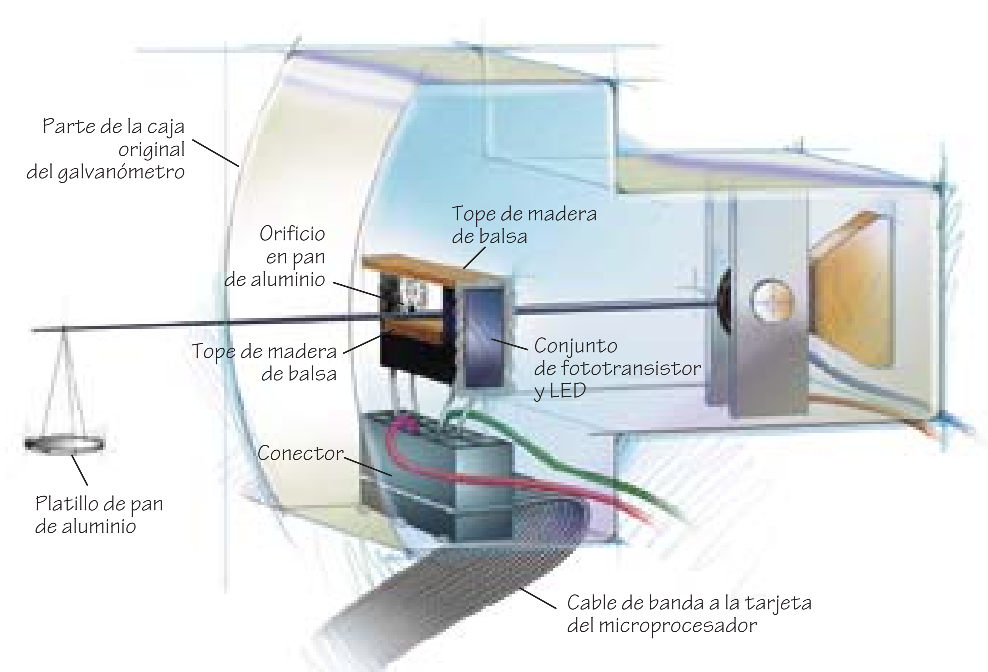
Sea el caso de la medición de masas pequeñísimas. George Schmermund desarrolló una fantástica solución aquí descrita en agosto de 1996. Extrajo la bobina y la armadura de un galvanómetro desechado y las montó en posición vertical, de tal modo que la aguja del instrumento se movía en un plano vertical. Conectaba luego la bobina a un voltaje variable y ajustaba éste hasta que la aguja adquiría una exacta horizontalidad. Una masa muy pequeña de peso conocido situada en el extremo de la aguja tiraba de ésta hacia abajo. Entonces George aumentaba el voltaje hasta que el brazo recuperaba su posición original. A mayor peso de la masa, mayor voltaje requerido para equilibrarla: la variación de voltaje indicaba, pues, el peso de la muestra. La electrobalanza de George pesaba masas de 10 microgramos (10 millonésimas de gramo).

Tal hazaña me dejó atónito. Mi asombro se ha redoblado con la gesta de otro de la cuadrilla, Greg Schmidt, quien ha mejorado ese singular resultado. Su diseño elimina la necesidad de ajustar a mano la aguja: la balanza se pone a cero (o sea, "se tara") y se nivela automáticamente; sigue de modo continuo el cambio de masa de un objeto (por ejemplo, la velocidad a la que una hormiga pierde agua al respirar). El resultado es una electrobalanza muy versátil y con sensibilidad micrográmica.

El ingenio de Greg parte del diseño básico de George. Le añade un microcontrolador (un pequeño ordenador con su unidad central de proceso y la memoria reunidos en un chip), programándolo para que envíe, a través de la bobina, 2000 impulsos por segundo de corriente de baja intensidad. La inercia de la armadura y la aguja hace que éstas no reaccionen a cada impulso, por lo que la desviación representa el promedio de la corriente que pasa por la bobina. Pero, eso sí, cada impulso parece lo bastante intenso para poner a vibrar los cojinetes del galvanómetro de Greg. Ese leve temblor reduce el "agarrotamiento", o tendencia de los cojinetes a trabarse a causa del rozamiento, efecto que parece explicar por qué un aparato tan barato responde a la tracción de masas minúsculas.

Pero Greg no diseñó el circuito para reducir el agarrotamiento. Tal propiedad se convirtió en una ventaja añadida al emplear la "modulación por ancho de pulso" para controlar la corriente media que atraviesa la bobina. Así, el tiempo entre impulsos sucesivos se mantiene constante, pero el microcontrolador varía el ciclo activo, o fracción del ciclo durante la cual la corriente es efectiva. Los trenes de impulsos de ciclos activos cortos imanan la bobina sólo durante una mínima porción del tiempo total; por ello, pueden elevar sólo los pesos más pequeños, mientras que los trenes de impulsos de ciclos activos más largos izan cargas mayores. El microprocesador de Greg puede generar 1024 valores para el ciclo activo, cifra que establece la gama dinámica de la balanza. Si la corriente máxima se ajusta para que el aparato eleve un miligramo, la masa detectable mínima será del orden de un microgramo.

Aunque tal sensibilidad es impresionante, no hay misterio alguno en el microordenador responsable. Realmente, el conjunto donde elegir da vértigo. Pero quienes no tengan idea de cómo elegir y programar un microprocesador no deben preocuparse: Greg desarrolló su instrumento pensando en los novatos. Así usó

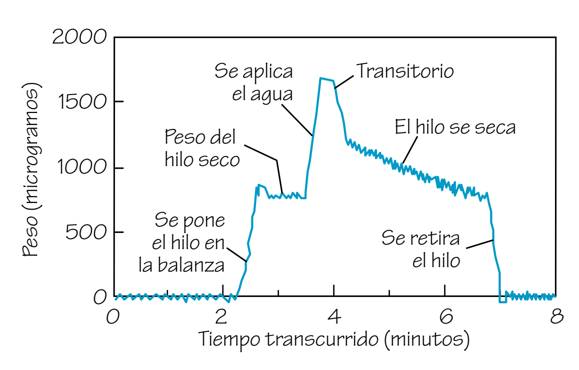


1. Un galvanómetro, desprovisto de la mayor parte de su caja de plástico y colocado de canto, se convierte en una balanza de gran sensibilidad. Un dispositivo óptico convenientemente encolado permite que un microordenador aplique una corriente de la intensidad justa para que la aguja se mantenga horizontal al añadir peso

el kit de evaluación AT 89/90 Series Flash Microcontroler de Atmel, que incluye un microordenador funcional y muy versátil, que se enlaza directamente a un ordenador personal. Ese kit (modelo STK-200) incluye todo lo necesario para ponerse en marcha y cuesta menos de 50 dólares (*véase catálogo en www.atmel.com*).

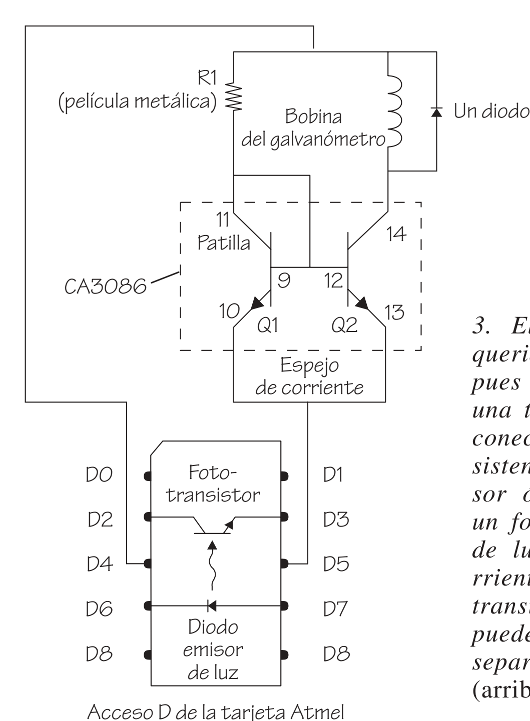
Desgraciadamente para los usuarios de Macintosh, ese sistema soporta sólo ordenadores compatibles IBM. En cualquier caso, no hay que proyectarlo todo partiendo de la nada, ya que Greg desarrolló la programación necesaria para manejar el aparato, incluyendo las instrucciones que muestran el peso en tiempo real en un pequeño indicador de cristal líquido (número de catálogo 73-1058-ND de Digi-Key; 800-344.45.39).

Vale cualquier galvanómetro con tal de que pueda medir corrientes pequeñas y de que la aguja tienda a seguir en su sitio al zarandearlo de un costado a otro. La electrobalanza de Greg capta la posición de la aguja mediante un fototransistor y un diodo emisor de luz. Pínchese un pequeño trozo de pan de aluminio con un alfiler y céntrese el orificio sobre el fototransistor (*figura 1*). Con el pan cubriendo la mayoría del fototransistor, la señal irá de todo a nada muy rápidamente cuando la aguja intercepte la luz del diodo. Péguese un trocito de madera de balsa, según se muestra, como tope de la aguja, exactamente en ese punto.



2. Un registro continuo de la variación del peso de un centímetro de hilo humedecido muestra la versatilidad del instrumento

Si la corriente en la bobina es demasiado pequeña, la aguja se apoyará en el tope de balsa inferior y bloqueará la luz. Una corriente excesiva eleva la aguja, apartándola de la trayectoria de la luz. La programación de Greg contiene un elaborado algoritmo que mantiene la aguja equilibrada entre esos dos estados.



Dos transistores NPN de conmutación unidos cara a cara

Q1

Q2

3. El conexionado electrónico requerido por el proyecto es mínimo, pues el microordenador reside en una tarjeta autónoma. Sólo hay que conectar dos transistores, una resistencia y un diodo, además del sensor óptico integrado (que contiene un fototransistor y un diodo emisor de luz). Aunque el "espejo de corriente" funciona mejor si sus dos transistores residen en el mismo chip, pueden emplearse transistores NPN separados si sus cápsulas se unen (arriba) *de modo que se mantengan a la misma temperatura*

Con el aparato calibrado y tarado, ese ancho de pulso refleja la masa de la muestra.

En la figura 3 se representa el circuito de control que consigue toda esta maravilla. Hay que ajustar el valor de R1 para establecer la máxima corriente en un valor que pueda soportar el galvanómetro. En éste puede aparecer indicada la corriente máxima. Si no, mídase con una resistencia variable, una batería de nueve volt y un amperímetro. El galvanómetro de Greg agotaba sus posibilidades con cinco miliampère; tuvo que programar, pues, el microcontrolador para que crease una corriente de cinco miliampère desarrollando un impulso de cinco volt entre los bornes de una resistencia de un kilo-ohm.

Pero esa corriente no se hace pasar por la bobina, sino que atraviesa un espejo de corriente, circuito en cuya virtud por la bobina fluye una corriente de la misma intensidad. Así aumenta espectacularmente la estabilidad a largo plazo de la balanza. ¿Por qué? La resistencia de la bobina depende de su temperatura, que sube siempre que en su interior se disipa energía eléctrica. Pero el circuito espejo mantiene constante la corriente, cualquiera que sea la temperatura de la bobina.

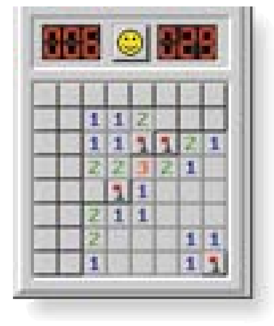
Por supuesto, la resistencia de R1 varía algo con la temperatura, con la consiguiente deriva de la calibración. Para evitarlo, emplearemos un componente de bajo coeficiente térmico; una resistencia pelicular metálica típica se desvía sólo 50 partes por millón por cada grado Celsius. Y habrá que mantener a la misma temperatura los dos transistores del espejo de corriente para que el circuito no derive. Lo mejor es emplear un juego de transistores adaptados en un solo chip, como el CA3086 (Circuit Specialists; 800-528.14.17). De otro modo, conéctense dos transistores NPN de conmutación con las cápsulas tocándose (*figura 3*).

En la figura 2 se ofrece una deliciosa demostración de la sensibilidad que consigue su aparato. Greg empapó de agua un centímetro de hilo fino. Registró su peso conforme se evaporaba el agua. Excelente.

La Society for Amateur Scientists (4735 Clairemont Square PMB 179, San Diego, CA 92117) proporciona todos los componentes para este proyecto, incluidos los transistores adaptados, así como un juego de pesas de calibración por 60 dólares. El paquete incluye los indicadores LCD, pero no la tarjeta de circuito, ni el galvanómetro, ni el kit de iniciación del microcontrolador Atmel. Para más información, consúltese www.sas.org ("Forum").

Ian Stewart

Un buscaminas de un millón de dólares



El Instituto Clay de Matemáticas, una institución educativa sin ánimo de lucro con sede en Cambridge (Massachusetts), ofrece millones de dólares en premios por las soluciones de siete problemas célebres todavía no resueltos. Uno de ellos es la conjetura P *contra* NP. Aunque tal cuestión es de una dificultad endiablada, un aficionado sagaz quizá la resuelva con ayuda del "buscaminas", un juego que funciona en la mayoría de los ordenadores personales.

Richard Kaye, de la Universidad de Birmingham, hizo notar en un artículo reciente la relación existente entre el juego y la conjetura P *contra* NP, Recordemos el desarrollo del juego. El ordenador empieza una partida mostrando un tablero cuadrado con todas las casillas vacías, algunas de las cuales ocultan minas explosivas. Se trata de determinar dónde se encuentran las minas sin provocar la detonación de ninguna. En la primera jugada hemos de 'picar' en una casilla cualquiera. Si hay debajo una mina, se nos acabó la suerte: la mina hace explosión y hemos perdido. Si no hay mina, el ordenador escribe un número en esa casilla, que indica el número de minas ocultas debajo de las ocho casillas adyacentes.

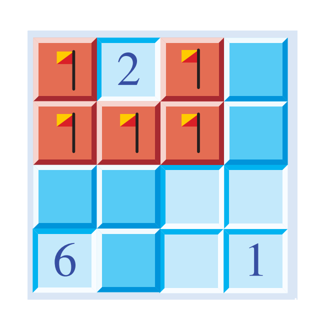
Nos servimos después de esta información para elegir cuál será la casilla siguiente que vamos a descubrir, y como antes, al hacerlo, o bien provocamos la explosión de una mina, o se nos dice el número de minas de las casillas colindantes. Cuando deducimos que una casilla oculta una mina, la marcamos con una banderita. Ganamos la partida si descubrimos todas las minas que hay en la matriz.

Volvamos al problema P *contra* NP. Recordemos que un algoritmo es un procedimiento ejecutable en un número finito de pasos bien determinados, destinado a resolver un problema. Una de las cuestiones clave de la matemática computacional estriba en medir con cuánta eficiencia un algoritmo resuelve un problema. O, dicho de otro modo, ¿qué relación existe entre el tiempo de resolución del problema y los datos iniciales? Cabe distinguir dos tipos de problemas: los de tipo P, ejecutables en tiempo 'polinómico', y los que no lo son. Un problema es de tipo P si puede ser resuelto mediante un algoritmo cuyo tiempo de ejecución no crezca más velozmente que cierta potencia fija del número de símbolos necesarios para especificar los datos iniciales. El problema es no-P si no se puede hallar la solución de ese modo. Los problemas de tipo P pueden abordarse en los ordenadores; en cambio, los problemas de tipo no-P no pueden ser resueltos de forma práctica, pues cualquier algoritmo a tal fin exigirá tiempos desmesurados para producir una solución.

Para demostrar que un problema es de tipo P basta hallar un algoritmo que lo resuelva en tiempo polinómico. Por ejemplo, la ordenación de una lista de números en orden creciente o decreciente es un problema de tipo P, razón por la que los programas comerciales de bases de datos ordenan grandes series de números o datos. Por contra, se tiene la convicción de que el "problema del viajante" —que consiste en determinar la ruta más corta que permite a un representante de comercio visitar cada una de las ciudades de un itinerario— es de tipo no-P, pero ello no ha podido ser demostrado. Se cree, asimismo, que la determinación de los factores primos de cualquier número entero dado es un problema de tipo no-P, pero tampoco está demostrado que así sea.

¿Por qué resulta tan difícil demostrar que un problema es de tipo no-P? Porque no es posible hacerlo analizando un algoritmo concreto. Es necesario contemplar todos los posibles algoritmos y demostrar que ninguno de ellos puede resolver el problema en tiempo polinómico. A lo más que se ha llegado es a demostrar que una amplia categoría de problemas candidatos a 'no-P' comparten el mismo rango: si uno de ellos se resolviera en tiempo polinómico, todos los demás podrían también. Los problemas anteriores tienen un tiempo de ejecución 'no determinísticamente polinómico', y se integran en la categoría o tipo 'NP'.

No se deben confundir las nociones de algoritmo no-P y algoritmo NP. En un problema NP no se conocen métodos para resolverlo en tiempo polinómico; en cambio, sí es posible verificar en tiempo polinómico si una supuesta solución es o no correcta. Pensemos en los rompecabezas. El ensamblaje del rom-



1. Una posición típica de buscaminas. Tras algunas jugadas, se han podido señalar con banderitas dos de las casillas que ocultan minas (a la izquierda). *Por examen de los números de los cuadros todavía por abrir podemos deducir que los cuadros de color morado han de estar minados y los verdes, no. Se ignora a qué tipo pertenece el cuadro amarillo, pero se puede determinar en una jugada más. La posición expuesta a la derecha no es lógicamente consistente: ninguna distribución de las minas podría generar los números contenidos en las casillas*

pecabezas puede ser dificultoso, pero si presumimos de haberlo resuelto, bastan por lo general unos segundos para verificar que la solución es correcta: examinar cada pieza y comprobar que encaja con sus vecinas. El tiempo requerido para hacerlo es aproximadamente proporcional al número de piezas, por lo que la verificación se realiza en tiempo polinómico. No sabemos, en cambio, construir uno de estos rompecabezas en tiempo polinómico. Si intentásemos resolver el problema comprobando una por una todas las posibles variantes, el tiempo de ejecución sería enorme, porque el número de hipotéticas soluciones crece mucho más rápidamente que cualquier potencia fija del número de piezas.

Muchos problemas NP tienen tiempos de ejecución equivalentes. En particular, se dice que un problema NP es NP-completo, si la existencia de una solución en tiempo polinómico para ese problema implica que todos los problemas NP tengan una solución con tiempo polinómico. Por tanto, si llegásemos a resolver un problema NP-completo en tiempo polinómico, habríamos resuelto de igual modo todos los problemas NP. La conjetura 'P *contra* NP' se plantea si las categorías P y NP son una misma, pese a todas las apariencias en sentido contrario. La respuesta que se espera es negativa. Pero si alguno de los problemas NP poseyera solución en tiempo polinómico, entonces NP tendría que ser igual a P.

Se sabe de muchos problemas que son NP-completos. Así, el problema SAT (sigla de Student Aptitude Test, examen de Selectividad), en el que intervienen circuitos lógicos. Tales circuitos se construyen a partir de las puertas lógicas Y, O y NO. Las entradas a estos circuitos son, o bien V (verdadero), o bien F (falso). Cada puerta combina las entradas de formas determinadas y genera una salida que resulta de tal combinación. Por ejemplo, una puerta NO convierte una entrada V en una salida F, y viceversa. El problema SAT pregunta si existen elecciones de las entradas que produzca una salida V para un circuito booleano dado. El problema se torna francamente difícil cuando el circuito contiene un gran número de puertas y de entradas.

El vínculo con el juego de ordenador aparece cuando introducimos el "problema de consistencia del buscaminas". No se trata ahora de encontrar las minas, sino de determinar si una posición del buscaminas es lógicamente consistente. Si, por ejemplo, durante el desarrollo del juego nos hallásemos en la posición indicada en el ángulo inferior derecho de la figura 1 (tablero de la derecha), nos percataríamos de que el programador ha cometido un error. Ninguna distribución de las minas puede ser consistente con los números indicados en las casillas.

Kaye demuestra que el problema SAT para un circuito booleano cualquiera puede transformarse en un problema de consistencia del buscaminas correspondiente a una cierta posición del juego. Lo que es más, demuestra que el procedimiento para la conversión de circuitos booleanos en posiciones del buscaminas opera en tiempo polinómico. En esta conversión, las entradas y salidas de circuito se crean la disposición de las minas en la matriz: una casilla con mina equivale a una V; una sin mina, a una F. El conductor que conecta las puertas del circuito está representado por la posición de buscaminas que vemos en la figura 2. En esta línea conductora del buscaminas, las casillas marcadas con *y* tienen los valores opuestos a los de las marcadas *x*; es decir, si las casillas *x* contienen minas (V), las casillas *y* no, y viceversa. Observemos que los números que aparecen en las demás casillas son correctos, tanto si *x* es V como si es F. El efecto del conductor es la "propagación" de cualquiera de las dos señales (V o F) en toda su longitud.

El mismo procedimiento permite la representación de las propias puertas lógicas. En la posición de buscaminas de la figura 2 se muestra una puerta NO. El bloque de números del centro impone un intercambio de las posiciones de *x* e *y*: *x* sigue a *y* en la línea de entrada, pero precede a *y* en la línea de salida. Los valores de las casillas resultan invertidos tanto si *x* es V como si es F, que es lo que hace una puerta NO en un circuito booleano.

La electrónica del buscaminas se complica mucho, desde luego. Además, es también necesario poder curvar y cortar los cables. El resultado es que, si se consigue resolver el problema de consistencia para una determinada posición de buscaminas, se habrá resuelto, en tiempo polinómico, el problema SAT del circuito equivalente. Dicho con otras palabras, el buscaminas es NP-completo. Por ello, si se llegara a descubrir una solución en tiempo polinómico para el problema de consistencia, todos los problemas NP tendrían soluciones de tiempo polinómico y, por tanto, P es igual a NP. Y, a su vez, si se lograse demostrar que no existe tal solución para el problema del buscaminas, entonces P no es igual que NP. En uno u otro caso, la cuestión tendría por fin respuesta.

No se olvide, empero, que el problema de consistencia del buscaminas es duro de roer. La averiguación de si una posición del juego es lógicamente coherente se vuelve muy difícil cuando se considera un tablero de dimensiones gigantescas; la mayoría de los matemáticos están convencidos de que no existe ninguna solución que funcione en tiempo polinómico. Además, el Instituto Clay ha impuesto reglas estrictas para el concurso: antes de que una solución sea aceptada como válida, ha de publicarse en una revista de renombre y ha de recibir la "aprobación general" de la comunidad matemática en el plazo de los dos años siguientes a su publicación.



2. La electrónica del buscaminas traduce los circuitos booleanos a posiciones del juego. Si los cuadrados marcados x *están minados, los marcados* y, *no; y recíprocamente. Una línea conductora de buscaminas* (arriba) *propaga una señal* (y *seguida por una* x) *por toda su longitud. Una puerta NO* (abajo) *invierte el orden de* x *e* y

NEXOS

James Burke

Y subiendo



El otro día, al salir de la biblioteca, una ambulancia pasó veloz a mi lado. En su frontal se leía con claridad AICNALUBMA, justo cuando yo salía de curiosear sobre la escritura especular de Leonardo da Vinci. Un representante genuino del Renacimiento. Los talentos e intereses de Leonardo fueron tan inmensos, que será mejor no entrar en detalles, salvo mencionar que me entusiasman sus dibujos anatómicos de alrededor de 1510. Uno sobre todo, el del riñón, fuente fecunda de problemas en una época en que los ricos y famosos asistían a banquetes de diez platos, regados con ríos de vino. Resultado: gota. Efecto: piedras en el riñón. En el siglo XVIII esta enfermedad era de las que reportaban pingües beneficios a los médicos de la gente importante.

En 1753 se ensayó un tratamiento en Edimburgo consistente en la disolución de los cálculos con agua de cal cáustica. Otra posibilidad la ofreció el estudiante de medicina Joseph Black, al proponer la administración de un preparado de carbonato de magnesio. Erró, pero durante los experimentos Black se topó con el dióxido de carbono, extinguiendo velas y gorriones, e inspiró las investigaciones posteriores y más famosas de sofocadores ilustres como Joseph Priestley y Antoine Lavoisier. (Probablemente Black sea más famoso por haberle explicado a James Watt algo relacionado con el calor latente, dando pie a que Watt desarrollara su idea del condensador independiente.)

En 1766 Black ganó la cátedra de química de Edimburgo, su viejo amigo y maestro William Cullen decidió pasarse a la medicina. Cullen debió parte de su éxito a la costumbre de dictar sus lecciones en inglés y no en latín. También sucumbió a la moda de clasificar las enfermedades de acuerdo con los síntomas, alias "nosología" (una muestra de su trabajo sobre el tema: "Melancolía. Síntomas: aversión a la acción y las obligaciones de la vida").

Cullen empleó como tutor de sus hijos a un maestro arruinado, John Brown, quien le devolvió la gentileza años más tarde, cuando, convertido también él en médico, abanderó un feroz ataque contra las prácticas de Cullen. En esa época, Brown se había granjeado tantos enemigos por no cerrar la boca, que nunca llegaría a ocupar plaza docente pública. Así que se puso a escribir unos *Elementos de Medicina* e inició una escuela de terapéutica basada en la idea de que todas las enfermedades se debían a un exceso o a una falta de excitabilidad y que, por tanto, se debían tratar con un estimulante (alcohol) o un sedante (opio).

Sus teorías produjeron tal furor, que partidarios y detractores llegaron a las manos en las calles de Göttingen. Al final, Brown moriría por tomar (demasiado) de su propia medicina. Sucedió en 1788, siete años antes de una edición tardía de los *Elementos* preparada por Thomas Beddoes, que también tenía sus propias ideas al respecto: tratamiento de todas las enfermedades mediante inhalación en su Instituto pneumático (equipado por Watt y financiado por Josiah Wedgwood). No merece Beddoes otra fama (el instituto fracasó) que la de haber contratado a un joven desconocido de 19 años: Humphry Davy.

De su universal renombre sólo daré algunas razones: la lámpara de los mineros, anestesia con óxido nitroso y (desde 1801) conferenciante de la Real Institución con un éxito tal, que la asistencia a sus lecciones se convirtió en moda para la elite intelectual. Pertenecía a ésta un íntimo de Davy: Samuel Taylor Coleridge, por aquel entonces conocido escritor y otro adicto al opio. Quien presentó a Davy a un joven, hasta la fecha escritor obscuro, aunque adicto también al opio. Thomas De Quincey, así se llamaba su gracia, alcanzaría la fama con las *Confesiones de un inglés fumador de opio* en 1821.

De Quincey vivió en un caos absoluto. En numerosas ocasiones no logró avanzar en lo escrito porque no era capaz de encontrar sus notas. Después de redactar durante años biografías para la *Britannica*, preparar ensayos ligeros para revistas y frecuentar a Wordsworth de forma asidua, De Quincey se trasladó a Escocia, donde se relacionó con Sir William Hamilton. Lo siguiente es un directo que no puedo aligerar porque su lectura hizo puré mi cerebro, así que esto es todo lo que puedo ofrecer: Hamilton, profesor en Edimburgo de lógica y metafísica, cuantificó el predicado. ¿Suficiente? (Si se quiere saber más, sumérjase en *Un examen de la filosofía de Sir William Hamilton*, de J. S. Mill, Londres, 1889, y sírvase cuanto se quiera.)

Uno de los alumnos de Hamilton fue un mancebo infeliz donde los hubiere, Archibald S. Couper. Un novelón lacrimógeno de dos pañuelos. En 1858 Archy trabaja en un laboratorio de París y solicita al jefe que busque a alguien para presentar ante la Academia

Francesa un trabajo que él ha preparado. Archy se muestra inquieto por la demora del jefe, quien no tarda en despedirlo. Vuelve a la oscuridad de Escocia. Mientras tanto, a alguien más se le ocurre la misma idea y recibe el honor y la gloria. Nunca más se vuelve a oír de Archy, quien terminará desquiciado.

¿Que quién fue el otro? Ni más ni menos que el noble Friedrich August Kekule von Stradonitz, cuyas ideas (los átomos se mantienen unidos gracias a las valencias: hidrógeno con un átomo, oxígeno con dos, etc. y el concepto de un anillo cerrado de átomos de carbono, como el anillo del benceno) prepararon el camino a la química estructural moderna. O en realidad, no lo hicieron, porque el pobre mediocre Archy Couper llegó antes.

Kekule, por otra parte, organizó el primer congreso internacional de químicos en 1860 en Karlsruhe, donde se puso orden en el caos de la terminología química. Por allí pasaba cierto ruso, Dmitri Ivanovich Mendeleyev, que luego demostraría ser demasiado demócrata para los gustos de sus maestros zaristas y perdería su plaza en la universidad. Terminó como director de la Oficina de Pesos y Medidas.

Resulta irónico, porque en 1869 Mendeleyev había descubierto la tabla periódica de los elementos, que dispuso según el peso atómico en orden creciente (me pregunto si alguien se dio cuenta de la ironía). Uno de sus compañeros de viaje por Europa (que también acudió al congreso de Karlsruhe) fue otro químico, Aleksandr Porfiryevich Borodin. Este hijo ilegítimo de un príncipe volvió en 1862 a San Petersburgo por una plaza de profesor, una vida de química y una lista de éxitos a la hora de abrir la profesión médica a las mujeres.

Para relajarse, Borodin salía con un grupo de veinteañeros que había conocido a través de un amigo de la infancia. Entre todos le animaron a tomar parte activa en algo que le reportaría más fama que la química: la música, especialmente su *Príncipe Igor*, un éxito seguro en conciertos de todo el mundo. Por aquel entonces, la música rusa se dividía entre la de los nacionalistas (Borodin y sus adláteres) y los occidentalistas, encabezados por Tchaikovsky. Uno de sus protegidos fue Sergei Rachmaninoff (cuya "Rapsodia sobre un tema de Paganini" es otro exitazo). Cuando estalló la Revolución de Octubre, Rachmaninoff marchó a los EE.UU., por lo que su música fue prohibida en Rusia, considerada "representante de la actitud decadente de la clase media baja".

En 1923 Rachmaninoff recibió una carta de otro emigrante. La misiva le impresionó tanto, que le envió 5000 dólares, con los que Igor Sikorsky fundaría la Corporación de Ingeniería Aérea en un granero de Long Island. En 1937 la compañía Pan Am cruzó el Atlántico en un aparato de Sikorsky con cuatro motores, el Clipper. Y en 1939 Sikorsky hizo realidad el sueño de su vida: construir y pilotar un artefacto que de pequeño viera en un dibujo de Leonardo: un helicóptero.

Tenía que poder volar.



De la *Naturphilosophie*

a Darwin

BIOLOGY INTEGRATING SCIENTIFIC FUNDAMENTALS. Dirigido por Brigitte Hoppe. Institut für Geschichte der Naturwissenschaften; Munich, 1997. **FRIEDRICH WILHELM JOSEPH SCHELLING. WERKE 6. VON DER WELTSEELE.** Edición de Jörg Jantzen y Thomas Kisser. Frommann-Holzboog; Stuttgart, 2000.

DAS TIERREICH ALS ORGANISMUS BEI JOHANN BAPTIST VON SPIX (1781-1826). SEINE AUSEINANDERSETZUNG MIT DER MANNIGFALTIGKEIT IM TIERREICH: DAS "NATÜRLICHE" SYSTEM, por Beatrix Bartkowski. Peter Lang; Frankfurt, 1998. **NATURA-CULTURA. L'INTERPRETAZIONE DEL MONDO FISICO NEI TESTI E NELLE IMMAGINI.** Dirigido por Giuseppe Olmi, Lucia Tongiorgi Tomasi y Attilio Zanca. Leo S. Olschki; Firenze, 2000. **IL CANCRO DELL 'IMPERATORE. DALLA TEORIA CELLULARE ALLE IPOTESI ONCOGENETICHE,** por Germana Pareti. Leo S. Olschki; Firenze, 2000.

BERICHTE ZUR GESCHICHTE DER HYDRO- UND MEERESBIOLOGIE UND WEITERE BEITRÄGE ZUR 8. JAHRESTAGUNG DER GGTB IN ROSTOCK 1999. Dirigido Ekkehard Höxtermann, Joachim Kaasch, Michael Kaasch y Ragnar K. Kinzelbach. VWB- Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2000.

CARL VOGT-JACOB MOLESCHOTT-LUDWIG BÜCHNER-ERNST HAECKEL. BRIEFWECHSEL. Edición preparada y anotada de Christoph Kockerbeck. Basilisken-Presse; Marburg, 1999. **DISSEMINATING DARWINISM. THE ROLE OF PLACE, RACE, RELIGION, AND GENDER.** Dirigido por Ronald L. Numbers y John Stenhouse. Cambridge University Press; Cambridge, 1999.

Suele creerse en error muy difundido que la ideologización de la biología empezó en el siglo XIX con la oposición a la doctrina evolucionista expuesta en el *Origen de las especies*, de Charles Darwin. Pero ese sesgo, del que se libraron en buena hora otras ramas del saber, venía lastrando la investigación desde muchísimo antes, si bien tomó cuerpo con los protagonistas del idealismo alemán y, en particular, con Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (*Von der Weltseele,* cuyo subtítulo reza: *Eine Hypothese der höhern Physik zur Erklärung des allgemeinen Organismus*).

Corrían paradójicamente aires de aproximación a la física y a la química en el tratamiento de las cuestiones de la vida por esas fechas finiseculares del XVIII (*Biology Integrating Scientific Fundamentals*). Dicho de otra manera, buscábanse unos fundamentos rigurosos y unas leyes generales, sometidos a contrastación empírica. Brigitte Hoppe sorprende esa voluntad en el conocimiento gradual del intercambio gaseoso y la función fotosintética. Lo explica mediante una sucesión de estadios experimentales, que empiezan con los ensayos químicos cualitativos con gases, en los que plantas y animales sirven de objetos de experimentación. Joseph Priestley observó (en 1771-1772) que las plantas y animales reaccionaban de manera distinta ante diferentes gases; morían si se exponían a gases "malignos" y se reanimaban en una atmósfera "sana". Pero no se percató de la significación fisiológica del intercambio gaseoso en los organismos.

Sucedió a ese primer estadio una serie de experimentos fisiológicos cualitativos acometidos por Jan Ingenhousz. Diseñó un aparato, anotó los procesos y registró las condiciones variables de luz, temperatura, agua y verdor foliar. Sólo las partes verdes de las plantas, bajo la influencia de la luz, mejoraban los "aires nocivos"; en obscuridad, las plantas no modificaban la salubridad de la atmósfera entorno. Reconocía, pues, los procesos de absorción del dióxido de carbono y de la respiración. (Del comportamiento de las plantas en las condiciones ambientales extremas de las minas, estudiadas por Humboldt, se ocupa aquí mismo Jahn.)

Los resultados de Ingenhousz recibieron confirmación en una fase ulterior, de química más depurada, representada por Nicolas Theodore de Saussure a comienzos del siglo XIX. Se sirvió de balanza, eudiómetro, termómetro y cronómetro para medir pesos, volumen de los gases, temperaturas y tiempos. Comprobó la nutrición de las plantas por dióxido de carbono y agua, con su aumento consiguiente en peso; aquéllas, en cambio, no podían incorporar directamente el nitrógeno de la atmósfera. Los análisis de cenizas le revelaron cantidades importantes de álcalis y ácido fosfórico en plantas jóvenes y, en las maduras, de carbonato cálcico y ácido silícico. Esa línea de trabajo halla su coronación, unos cuarenta años más tarde, en las investigaciones de Matthias Jacob Schleiden.

Entre los experimentos de Ingenhousz y los informes de Saussure apareció en Alemania *Von der Weltseele* ("Sobre el alma del mundo") de Friedrich Wilhelm Joseph Schelling, compañero de Hölderlin y Hegel en Tübingen, estudioso de ciencia y matemática en Leipzig, seguidor de Fichte en Jena. Arquitecto creador de la *Naturphilosophie*, sostenía que la naturaleza debía recibir un tratamiento más holista que el concedido por la ciencia newtoniana o el idealismo trascendental. De sus muchos escritos sobre la cuestión destacan *Ideen zur einer Philosophie der Natur* ("Ideas para una filosofía de la naturaleza"), 1797) y *Von der Weltseele* (publicado en 1798).

Partiendo de la "objetividad pura", la *Naturphilosophie* defiende que la naturaleza acomete un proceso de inconsciente desarrollo del yo. Justifica la unidad última de la naturaleza y la diversidad de sus manifestaciones mediante un sistema de fuerzas ocultas, o "polaridades", que van apareciendo en niveles de complejidad creciente de organización. En definitiva, la naturaleza es un organismo cuyo principio vital descansa en el oxígeno y en la oposición de los elementos contrarios. Tras su estela, los *Naturphilosophen* románticos promovieron una visión del mundo entendido como un todo orgánico que se desenvolvía a través de sus propias creaciones en el curso del tiempo y formaba gradaciones con el hombre en la cúspide.

La doctrina de Schelling prendió en numerosos naturalistas germanos (*Das Tierreich als Organismus bei Johann Baptist von Spix*). Antes que

zoólogo, Johann Baptist von Spix (1781-1826) había sido teólogo protestante y médico. Su nombre va unido a una de las expediciones naturalistas más importantes del siglo XIX, la que realizó de 1817 a 1820 con el botánico Carl Friedrich Philipp von Martius. La cosecha de tal exploración del Amazonas —85 especies de mamíferos, 350 especies de aves, unas 2700 especies de insectos, entre otras— aportó material para numerosas investigaciones de otros científicos.

En el Museo Nacional de Historia Natural de París Spix conoció de una manera sistemática la nueva zoología que enseñaban Cuvier, Lamarck y Geoffroy Saint-Hilaire. La aplicó a un sector que, escasos decenios después, se convertiría en el motor de la disciplina, la biología marina. Fruto de su viaje en 1808 a Le Havre, fue la *Mémoire pour servir à l´histoire de l´astérie rouge*. De mayor peso resultó, no obstante, su contribución a la anatomía comparada (*Geschichte und Beurtheilung aller Systeme in der Zoologie*) que remató en una monografía espléndida, *Cephalogenesis*, donde defendía el mismo plano fundamental para las vértebras y el cráneo.

Aunque en esos trabajos y otros de anatomía y paleontología se hace palmaria la influencia de Cuvier, Spix depende sobre todo de Schelling, de quien toma la idea del reino animal como un organismo absoluto, cuya multiplicidad de manifestaciones explica a través del "sistema natural". De la *Naturphilosophie* aprendió también el método y contenido de la filosofía de la ciencia, que aplicaría a la comprensión de la embriología de Döllinger y la anatomía de Wiedemann. La intelección del sistema natural, razona Spix, implica el análisis de la diversidad y síntesis de procesos unitarios en tal diversidad. El análisis exige un conocimiento exhaustivo de la anatomía y de la relación y orden de los órganos. La relación de continuidad y discontinuidad nos pone de manifiesto que el mundo animal es un gran organismo. En el análisis no sólo debe entrar la morfología y anatomía, sino también, el medio, el comportamiento, la estructura y la función.

Junto a esa inquietud experimental y filosófica en las ciencias de la vida persistían los métodos antañones de herborización, clasificación e ilustración (*Natura-Cultura. L'interpretazione del mondo fisico nei testi e nelle immagini*). A veces se imbrican mutuamente, por más que sea en aspectos marginales, como se detalla a propósito de la obra de Robert Thornton, botánico autor de una celebérrima *New Illustration of the Sexual System of Linnaeus* (1807), lo que no obsta para que se alegre de los experimentos de Ingenhousz que demuestran la intervención de la luz y el dióxido de carbono en el desarrollo de las plantas.





C. L. Bonaparte. Iconografia della Fauna Italica, Roma, 1832-1841

Las empresas tipográficas que entre finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX habían acompañado el extraordinario desarrollo de los estudios naturalistas en Francia, Inglaterra o Alemania, habían revelado una generación de brillantes artistas formados en los museos, en los jardines botánicos y en las academias. Cuvier tenía en mucho las *Testacea utriusque Siciliae eorumque historia et anatome tabulis aeneis illustrata*.

En congresos, así el de Pisa en 1839, se ponderan y aplauden óptimas creaciones plásticas, como las ilustraciones que adornan la *Flora Dalmatica* de Roberto de Visiani, las litografías de las *Stirpes Italicae rariores vel novae* de Vincenzo Cesati o las flores y frutos modelados en cera de Antonio Targioni Tozzetti. Flora y fauna. En Turín, un año después, Carlo Luciano Bonaparte avanzaba su *Iconografia della Fauna Italica*, mientras que en Lucca, en 1843, se examinaban las "exactísimas figuras" con las que de Filippi embellecía la

memoria *Sopra alcuni pesci d'acqua dolce della Lombardia*.

Para entonces se había abierto camino ya la teoría revolucionaria de la fitogénesis (*Il cancro dell 'Imperatore. Dalla teoria cellulare alle ipotesi oncogenetiche*). El artículo fundacional apareció en 1838 en el *Archiv* dirigido por Johannes Müller. Schleiden proponía que el elemento último del las plantas eran las células, idea que Theodor Schwann generalizó un año más tarde al reino animal. De acuerdo con la nueva teoría, las células de las plantas y animales se desarrollaban de la misma forma y a tenor de las mismas leyes, cualesquiera que fueran sus funciones fisiológicas ulteriores.

Schwann se interesó también por los modos de transformación de las células en tejidos, "metamorfosis" evidente en el cristalino del ojo en el embrión de pollo y, luego, en el adulto. Situó la formación de los núcleos en una *Zellenkeimstoff* (sustancia germinativa celular), a la que se llamó citoblastema. Hasta ahí llega Germana Pareti en su exhaustiva búsqueda de las raíces celulares del cáncer en su más que notable monografía, donde la naturaleza del tumor es el protagonista a cuyo alrededor giran Federico III, Rudolf Virchow, Ernst von Bergmann, Morrell Mackenzie, Hermann Lebert, los análisis histopatológicos, las técnicas microscópicas, el orgullo alemán y numerosos actores más.

Müller, maestro de Schleiden y Schwann, había distinguido ya cuidadosamente, en 1836, formas tumorales malignas y benignas. Con la teoría celular establecida, legiones enteras de microscopistas franceses y alemanes se dedicaron a la búsqueda de la célula "específica" del cáncer. Se convino en que el elemento específico que parecía diferenciar este tipo de célula de las de otras neoformaciones morbosas de naturaleza benigna residía en el núcleo, de color más brillante y de dimensiones mayores en la primera.

Sin embargo, la hipótesis de la transformación de un tejido en otro era reputada imposible. Entraba en plana contradicción con la idea de persistencia, en nombre de la cual una fibra de tejido muscular no se habría podido transformar nunca en una fibra de tejido conectivo. Tal hipótesis violaba, además, la doctrina del origen común de todas las células, en virtud de la cual una célula, epitelial o conectiva, no podía modificar su propia naturaleza para convertirse en célula específica del cáncer.

En el marco de su "patología celular", Virchow explicaba la formación y el desarrollo de los tejidos, normales o alterados (tumores incluidos) a partir de una misma matriz indiferenciada, el tejido conectivo. Pero ya hacia finales de los años sesenta, esa tesis aparecía insuficiente, porque la génesis de una clase importante de neoformaciones malignas, las carcinomatosas, no podía remitirse a las células conectivas. Entre 1861 y 1867, numerosos patólogos apunta-

Mecánica cuántica desde una perspectiva moderna

INTERPRETING THE QUANTUM WORLD, por Jeffrey Bub. Cambridge University Press; Cambridge, 1999.

Este es un libro excelente sobre la mecánica cuántica y sus interpretaciones, escrito por un experto que lleva más de 30 años trabajando activamente en el campo. Contiene abundante información y esclarecedoras reflexiones sobre dos "problemas" que han marcado la historia de la mecánica cuántica desde su nacimiento en los años veinte: el "problema de la medida" (que se puede resumir en que la teoría —en la formulación de Dirac y von Neumann— requiere un postulado ad hoc, según el cual al hacer un experimento sobre un sistema físico el estado cuántico de éste "colapsa" a un valor concreto) y el de la interpretación del formalismo matemático en términos de elementos de realidad.

Para la mayoría de los físicos el problema de la medida es, como mucho, una "nubecilla" en el horizonte. Esencialmente hay cuatro formas de afrontarlo: negar su existencia, adoptar una solución válida "para todos los propósitos prácticos", cambiar la dinámica de la teoría (sustituir la ecuación de Schrödinger por una variante no-lineal), o adoptar una interpretación realista restringida.

La interpretación de Copenhague es del primer tipo. Niega que exista un problema porque no concibe el estado cuántico como una entidad física genuina sino como una herramienta informativa. Las interpretaciones modernas, que hacen énfasis en la "decoherencia" como un fenómeno físico real, la interpretación de los "muchos mundos" o la de "historias consistentes", estarían entre el primer y el segundo tipo y, según el autor, tampoco resuelven el problema. Las del tercer tipo no se abordan en este libro, aduciendo que no son interpretaciones de la mecánica cuántica sino teorías distintas.

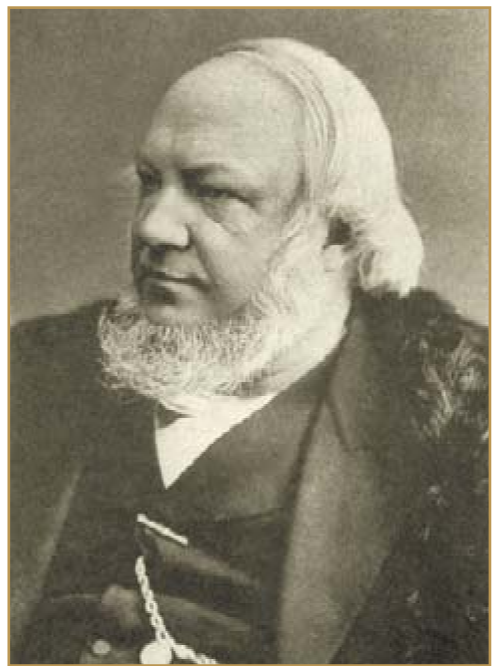
El autor defiende que la única solución aceptable estaría en las interpretaciones que tratan de preservar el realismo einsteiniano. Sin embargo, el formalismo de la mecánica cuántica impone dos escollos a tales interpretaciones: los teoremas de Bell y de Kochen y Specker. Según estos teoremas ninguna interpretación puede ser "realista" en el sentido que hubiese preferido Einstein (que los valores de todos los observables físicos estén predeterminados). En el capítulo 2 se describe el argumento de Einstein-Podolsky-Rosen según el cual la mecánica cuántica sería incompleta, y el contraargumento de Bell (en una formulación más moderna y sencilla), según el cual la mecánica cuántica no puede completarse como sugerían EPR. Ofrece la presentación del teorema de Kochen-Specker más exhaustiva y mejor documentada hasta la fecha. Una forma de esquivar ambos teoremas es suponer que sólo algunos observables privilegiados poseen valores predeterminados.

En el "corazón" del libro se demuestra un teorema (cuyo enunciado se ha simplificado en esta edición revisada) que viene a decir que, si bien existen infinitas interpretaciones realistas restringidas, cada una de ellas está asociada a la elección de un observable físico particular como aquél con valores predeterminados. Estas interpretaciones resuelven el problema de la medida, siendo la de Bohm y "modal" ejemplos de interpretaciones realistas restringidas. El autor deja abierta la cuestión de cuál de las infinitas posibles sería "la" interpretación correcta, aunque manifiesta sus preferencias por aquélla en la que la posición discretizada interpreta el papel de observable privilegiado. Incluso aunque no se compartan sus conclusiones, no hay duda de que nos encontramos ante un libro fundamental para comprender la mecánica cuántica desde una perspectiva moderna.

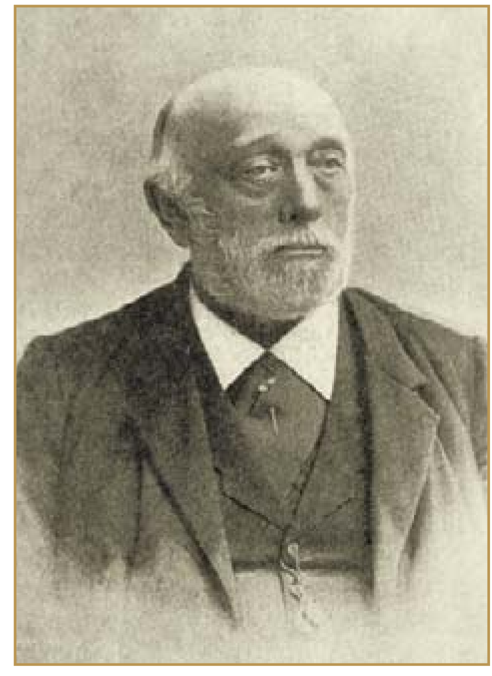
—ADÁN CABELLO QUINTERO



Carl Vogt



Jacob Moleschott



Ludwig Büchner

ron ya hacia otros tejidos germinales, en particular el endotelial y el epitelial, con la oposición de Virchow. Pero, ante la enfermedad del emperador, no lo quedó más remedio que admitir que había que establecer si el epitelio de los alvéolos cancerosos derivaba del epitelio superficial preexistente o se originaba en el tejido de los estratos más profundos.

La botánica no sólo alumbró la citología. Allanó también el camino de la genética. Lo cuenta Orel en *Berichte zur Geschichte der Hydro- und Meeresbiologie und weitere Beiträge zur 8. Jahrestagung der GGTB in Rostock 1999*, volumen de ponencias centradas, sin embargo, en el nacimiento y desarrollo de la biología marina. En coherencia con los últimos logros en fisiología vegetal Franz Diebl, profesor de historia natural y ciencias agrícolas de Brno, supuso que los nuevos caracteres de las plantas procedían de una fecundación híbrida, que podrían reunirse caracteres parentales y que podría reproducirse la combinación de caracteres en nuevas variedades. Las enseñanzas de Diebl hicieron mella en su discípulo más aventajado, Gregor Mendel.

La biología marina tuvo uno de sus focos principales en las costas del norte, merced al impulso que le dio Karl Ernst von Baer, descubridor de factores esenciales que influyen en los bancos de pesca. Combinó éste métodos biológicos, geográficos e hidrográficos para la promoción de la hidrobiología como ciencia independiente. En los países sureños la investigación se centraba en la fauna adriática y cercana a Niza, en un tiempo en que no se habían fundado todavía estaciones zoológicas permanentes. A Haeckel y Hensen se debe en buena medida la sistematización de la nueva ciencia en torno a la función del plancton. (Ilse Jahn, en un trabajo de investigación archivística, realiza un estudio comparativo de sus métodos.)

Ernst Haeckel fue el científico más sólido —pese a las debilidades que la investigación histórica está sacando a la luz— de los cuatro referidos en el título de un epistolario recogido y anotado por Christoph Kockerbeck, *Carl Vogt-Jacob Moleschott-Ludwig Büchner-Ernst Haeckel. Briefwechsel*, una obra dedicada a la mayor gloria del pensamiento materialista que caló en numerosos centros europeos del siglo pasado. Opuesto a Schelling, ese movimiento hunde sus raíces en la izquierda hegeliana, muy en particular en Feuerbach. La ciencia era, sin embargo, arma y ropaje de una ideología sin contrastación empírica.

Carl Vogt había nacido en julio de 1817 en Giessen. Estudió algo de química y se doctoró en medicina con un ensayo sobre anatomía de los anfibios. Se relacionó en un principio con el círculo de Louis Agassiz, un firme antievolucionista. Pasa a París, donde participa en cenáculos revolucionarios. Y proclama el credo materialista. Si en su interpretación de las sociedades animales (*Untersuchungen über Thierstaaten*, 1851) apuntalaba la organización social del hombre en aquéllas, tras la aparición del *Origen de las especies*, incorpora el darwinismo a sus postulados, según se refleja en su teoría polifilética del origen de la humanidad (*Vorlesungen über den Menschen, seine Stellung in der Schöpfung und in der Geschichte der Erde*, "Lecciones sobre el hombre, su lugar en la creación y en la historia de la Tierra"). Para Vogt, el hombre y la naturaleza han salido de un principio único.

Jacob Moleschott (1822-1893), discípulo de Henle en microscopía y de Bishoff en anatomía, se adhería la doctrina materialista en su obra divulgadora *Kreislauf des Lebens* ("El circuito de la vida"), aparecida en 1852. Su interés por la filosofía de Hegel le llevó a intimar con Ludwig Feuerbach y otros "jóvenes hegelianos" pioneros del materialismo histórico. A la divulgación de la nueva se entregó con especial ahínco Ludwig Büchner (1824-1899) a través de la muchas veces editada *Kraft und Stoff* ("Fuerza y materia"), "un estudio filosóficonatural empírico", y el rosario de las que siguieron. Büchner fue el autor de cabecera de la izquierda española, devoradora de la traducción francesa y más tarde española de *Ciencia y naturaleza*, *La vida psíquica de las bestias*, *Fuerza y materia*, *Luz y vida*.

Medicina universitaria española

La enseñanza de la Medicina en la Universidad española, primera parte, coordinado por José Danón. Colección Histórica de Ciencias de la Salud, n.º 6, Fundación Uriach 1838; Barcelona, 1998.

Una muestra más de las actividades de patrocinio que la Fundación Uriach 1838 regala a la historia de la medicina hispana es este bien presentado texto, de amplia caja y profusión de ilustraciones, que se anuncia como primera entrega de una serie dedicada a la historia de la enseñanza de la medicina. En su confección participan prestigiosos profesores, de los que han protagonizado el florecimiento de la especialidad histórico-médica en la segunda mitad del siglo XX en España, hasta el punto que uno falleció reciente e inopinadamente (Delfín García Guerra, poco antes de la aparición del libro) y otros cuatro están jubilados (Pedro Laín, que firma el prólogo, el mismo José Danón, Agustín Albarracín y José María López Piñero). Completan la nómina autoral el actual catedrático de Sevilla Juan Luis Carrillo y Josep Lluís Barona Vilar, profesor en Valencia.

El libro se inicia con una presentación general de la evolución del pensamiento médico desde la Baja Edad Media a 1857, la fecha de promulgación de la ley Moyano, realizada con su habitual buena pluma por el profesor López Piñero, donde se da cuenta de los distintos planes de estudio y de la contribución de distintos centros. Este capítulo constituye una síntesis muy ajustada de los principales problemas científico-médicos en relación con el reclutamiento y formación de profesionales de esa amplia época, que sirve de perfecta introducción al cuerpo central del texto.

A continuación, siguen cinco capítulos dedicados cada uno a una Facultad concreta (Madrid, Valencia, Sevilla, Barcelona y Santiago) desde mediados del siglo XIX a la actualidad. El plan, sin embargo, no sigue un desarrollo homogéneo, porque cada autor ha seleccionado un espacio cronológico distinto (Madrid, de 1843 a 1967; Valencia, de 1857 a 1960; Sevilla, de 1843 a 1917; Barcelona, de 1843 a 1955; Santiago, de 1843 a 1936) y además, el enfoque de cada historia local da prioridad a aspectos diferentes en cada capítulo, algunos de ellos, en particular la exposición de lo ocurrido entre 1843 y 1857, producen una reiteración de contenidos y explicaciones donde —dado el carácter centralista de la organización universitaria— sólo cambia el nombre de la ciudad en la que se ubica el centro universitario en estudio.

El capítulo dedicado a Madrid se fija sobre todo en los problemas de la titulación múltiple y relata con minuciosidad los contenidos de los distintos planes de estudio. El capítulo de Santiago hace hincapié en los problemas de relación entre facultad y hospital, o enseñanza y beneficencia, a propósito de las prácticas clínicas. El apartado barcelonés sigue de manera más minuciosa la nómina de profesores, dedicando amplio espacio al comentario de su producción literaria y opción política pro o anticatalanista; el recuerdo de los años de postguerra se basa en la experiencia personal del autor. El caso de Sevilla se estudia desde la perspectiva de creación de una tradición universitaria local, toda vez que la facultad de medicina del distrito universitario hispalense estaba situada en Cádiz, y sólo a partir de 1868 se gestó un centro en la misma ciudad, de manera que se presta particular atención a la organización y dependencia cambiante del mismo, desde el tiempo de Escuela Libre al de facultad, y se sigue la incorporación de profesorado con gran minuciosidad cronológica.

El capítulo dedicado a Valencia, por su parte, se divide en tres grandes apartados cronológicos, segunda mitad del siglo XIX, primera mitad del siglo XX y franquismo (hasta 1960), que aborda sistemáticamente en tres grandes epígrafes temáticos: estudiantes, recursos docentes, y profesores y corrientes científicas, si bien para el segundo de sus períodos el tema central



Lámina del cerebelo diseñada por Cajal. Biblioteca y Museo Histórico-Médico de la Universidad de Valencia

y prácticamente único es el de "recursos", en el sentido de la instalación de la facultad.

El libro constituye una interesante aportación que pone en manos de un amplio público las claves centrales en el devenir de la enseñanza universitaria referida a medicina en España. No sólo sirve al curioso para obtener la información básica acerca de estudios, profesores o edificios de su facultad en la época contemporánea, sino que de la lectura del libro en su conjunto se obtiene una imagen nítida de las tensiones entre tradición y renovación, centralismo y localismo (o autonomía), asistencia y docencia, experimentalismo y teorización, que han modulado la práctica docente de la medicina española a lo largo de los siglos. Y eso pese al cierto desconcierto que produce la falta de homogeneidad en el abordaje de las distintas historias locales. Su gran formato y excelente presentación completan la dignidad de esta nueva entrega de la Colección Histórica de Ciencias de la Salud.

—Esteban Rodríguez Ocaña

Pudiera pensarse que la apropiación del darwinismo por la izquierda hegeliana provocaría el movimiento reflejo de oposición al mismo de cuantos se apartaran de dicha tendencia filosófica. No fue tan simple (*Disseminating Darwinism. The role of place, race, religion, and gender*). Aunque por mor de reducción dialéctica resumiéramos en dos las respuestas al darwinismo, a saber, la de los que lo aceptaron y la de los que lo rechazaron, caeríamos en un error histórico si identificáramos los partidarios con los científicos mejor preparados y los opuestos con los cerrados a todo progreso. En los dos lados hubo expertos, con predominio de los escépticos o contrarios. (No obstante, sabido es también, que la ciencia se decantó, desde el segundo tercio del siglo XX, por la tesis de la evolución a través de la selección natural, mas para entonces la ideologización se había deshinchado.)

Influyó en la postura tomada el entorno local. En Canadá, por ejemplo, la supervivencia en un medio hostil predispuso a la aceptación de la explicación darwinista de la naturaleza. En Nueva Zelanda la aceptación procedía, pese a su clima templado, del entorno social, en particular de la situación planteada por los maoríes indígenas, que se oponían al avance de los colonos blancos. Ante este obstáculo, algunos habitantes recurrieron a la evolución como arma ideológica para su lucha contra los maoríes.

Hubo discrepancias en el medio religioso. Consideremos el mundo protestante, diseccionado aquí en espléndido ensayo que aborda la reacción de tres núcleos calvinistas de excelencia: Princeton, Belfast y Edimburgo. Las respuestas se fechan en el mismo año de 1874. En octubre, Robert Rainy, decano del Colegio Nuevo de Edimburgo, dictaba su conferencia inaugural del curso sobre "Evolución y Teología". Disertó a favor de la evolución, incluida la humana, aduciendo que en nada contravenía los postulados teológicos. Concedía plena autonomía a la ciencia, salvo que ésta abandonara su ámbito de competencia. Ese mismo invierno, en Belfast, J. L. Porter, profesor de exégesis bíblica, dictaba su conferencia de apertura de curso en la facultad presbiteriana. Atacaba las "diabólicas tendencias de teorías científicas recientes", en particular aducía que la evolución suponía una auténtica amenaza contra todo pensamiento virtuoso. El trabajo contrarrestador de los teólogos se hacía, pues, más imperioso que nunca. En su opinión no había ningún hecho científico establecido del que se dedujeran lógicamente los dogmas perniciosos de Huxley y Tyndall. Los hechos aportados por Darwin eran ciertos, pero la interpretación era errónea. Una misma confesión protestante se comportaba de un modo distinto en Edimburgo y en Belfast.

A principio de mayo de ese mismo año, Charles Hodge, del Seminario Teológico de Princeton, acababa de publicar *What is Darwinism*?, un extenso análisis de la cuestión. Sostenía que Darwin empleaba la palabra "natural" en oposición a "sobrenatural"; por tanto, buscaba eliminar todo tipo de proyecto o finalidad. La selección ocurría a ciegas. Ahí estaba, en su opinión, el núcleo de la tesis darwinista. Ello constituía no ya un ataque contra el cristianismo sino contra la misma religión natural. Al establecer los lindes y términos de la discusión, señalaba quién era o no darwinista. Biólogos de la talla de Asa Gray, darwinista cristiano declarado, o estaban equivocados o confusos. No cabía en su opinión tal adscripción. Pese a su empeño, seguía Hodge, el botánico Gray no era darwinista, sino un *evolucionista* cristiano. Y eso era otro asunto.

—LUIS ALONSO

Guía para docentes

DEL ÁTOMO AL QUARK, por Ramón Pascual. Instituto de Ciencias de la Educación y Ediciones Vicens Vives; Barcelona, 1999.

"Del átomo al quark" viene a llenar una laguna que concierne a obras de divulgación científica que cubran los grandes desarrollos del siglo XX en el campo de la estructura más íntima de la materia.

La exposición sigue el orden cronológico de los descubrimientos, que en este campo coincide con el de la exploración de ámbitos cada vez más diminutos de la naturaleza y de las leyes que los rigen: el átomo, el núcleo, las partículas subatómicas y los quarks. El enfoque es pedagógico y transmite tanto el entusiasmo que siempre ha envuelto a este campo como la perspectiva reduccionista que sigue orientando las investigaciones, todavía en la actualidad: la creencia en que la complejidad de las estructuras observadas con los aceleradores más potentes y los detectores más precisos al alcance, son un reflejo de niveles de composición todavía más ínfimos, más simples y, por ello, más fundamentales.

Arranca con la clasificación de la tabla periódica, cuyo éxito llevó a la predicción de elementos desconocidos hasta la fecha que pasarían a llenar los huecos que tenía la tabla, sin candidatos para ocuparlos. El siguiente paso fue la observación de una imagen discreta de la materia, compuesta por átomos, que a su vez constaban de un núcleo central, pequeño en comparación con el tamaño del átomo, y de electrones orbitando el núcleo: la regularidad de la tabla quedaba justificada, resultando los distintos elementos de combinaciones diferentes de protones y neutrones, según su naturaleza.

En todos los otros grandes descubrimientos que se han sucedido que recoge el libro los acontecimientos siguen un relato con un marcado paralelismo con el anterior: los núcleos se han visto formados por protones y neutrones, quienes, junto a los muchos *hadrones* que se han ido produciendo en los aceleradores con haces cada vez más energéticos, tienen una composición sencilla, con los quarks como las piezas del rompecabezas. Y deberíamos añadir los leptones a lista, el fotón, los $W^{\pm}$, el Z^0, el gluon, el gravitón. El relato es un buen ejemplo del desarrollo científico, en el que teoría y experimento han ido proponiendo nuevos retos, a menudo de forma alternada. Cabe resaltar finalmente el esfuerzo por presentar en una obra de estas características la relación que tienen las partículas elementales con la evolución y la estructura del universo.

Veo en el libro un relato muy válido para servir de guía a los docentes de enseñanza secundaria que deben transmitir a las nuevas generaciones un cuerpo de conocimiento actualizado, cuando las pruebas experimentales en las que se basan los desarrollos teóricos más recientes que recoge el libro no son menores, por ejemplo, que los que en su día llevaron al descubrimiento de la composición del átomo. Puede también resultar ilustrativo y de lectura amena a los lectores no expertos que sientan curiosidad por el tema. —JOSEP TARON

IDEAS APLICADAS

Naomi Lubick

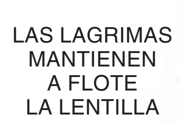
Lentes de contacto. Duras y blandas

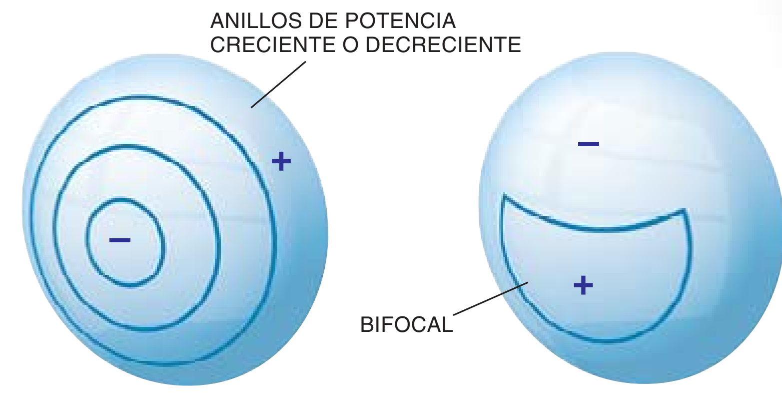
En los ojos de millones de personas flotan pequeños discos de plástico, encaminando la luz que penetra en ellos y aclarando su vista. Sólo en EE.UU., el año pasado unos 34 millones de personas usaban lentes de contacto, las famosas lentillas. De éstas la mayoría eran blandas (o “hidrogel”), ideadas para ser desechadas al cabo de un día, dos semanas o algunos meses; necesitan una limpieza diaria. Las lentillas blandas de “uso prolongado” pueden usarse continuamente, noche y día, hasta un plazo de una semana. No llega al 15 por ciento la proporción de usuarios que emplean lentillas rígidas permeables a los gases, que, cuidadas, duran años.

Las lentillas rígidas se hacen de polímeros plásticos (butiracetato de celulosa, silicona de poliacrilato o elastómeros de silicona) que son hidrófobos. David T. Grubb, físico de materiales de la Universidad de Cornell, describe su estructura molecular como abierta con grandes intersticios por donde pasa el oxígeno. Por contra, los polímeros de hidrogel son hidrófilos, que atraen y absorben agua en cantidades variables según las marcas comerciales. El agua que se mueve por entre la estructura molecular de las lentillas blandas lleva oxígeno con ella.

Cuando se cierran los párpados, los contactos impiden el paso del oxígeno a la córnea, transparente y delicada, entorpeciendo la recuperación rutinaria del tejido. Algunas mezclas de polímeros hidrofílicos contienen más oxígeno que otras, pero tales mezclas favorecen además la adherencia a las lentillas de las proteínas de las lágrimas. Esos depósitos de proteínas pueden albergar patógenos, aumentando las posibilidades de infección. La dificultad para fabricar lentillas de uso prolongado estriba en dar con la mezcla de polímeros apropiada.

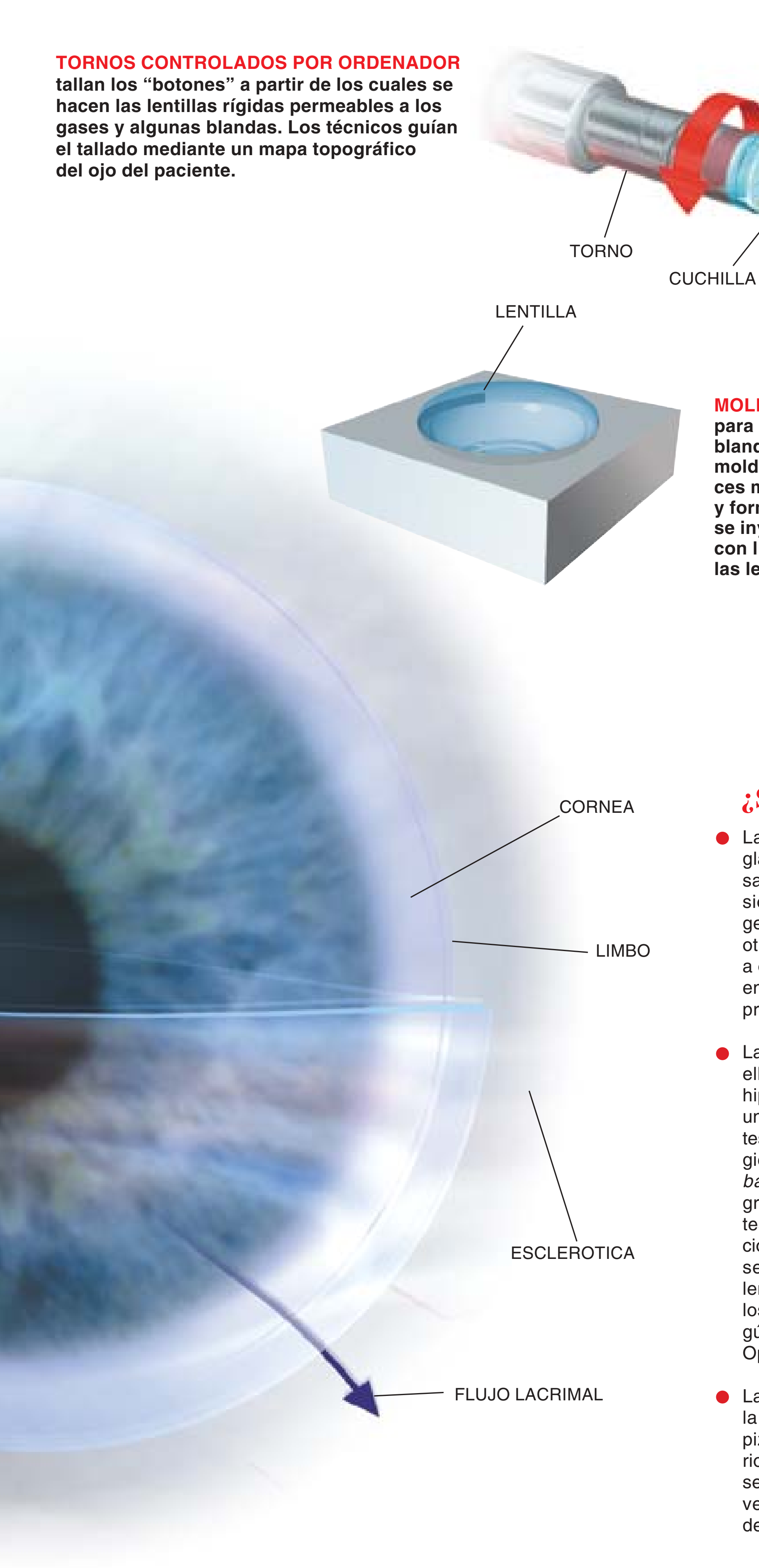
LAS LENTES DE CONTACTO BLANDAS se amoldan a la forma de los ojos, cuya esfericidad no es perfecta. (Las lentillas duras deben tallarse para que se adapten, y resbalan si no se conforman correctamente.) Debido a la protuberancia de la córnea, el contacto recuerda un relieve de montaña, con estribaciones planas, laderas escarpadas y cima cónica. Las lentillas blandas cubren las zonas contiguas del limbo y la esclerótica (mientras que las rígidas se asientan sólo sobre la córnea) y, en virtud de su tamaño, pueden ser sujetadas en parte por los párpados. La película lacrimal contribuye con la tensión superficial (capilaridad) a mantener en su sitio lo mismo a las blandas que a las rígidas.





LAS LENTILLAS BIFOCALES ABOMBADAS pueden ser blandas o duras. Tienen aros concéntricos de material que “corrigen” la visión en grados variables. Para mirar a un objeto, el cerebro elige automáticamente cuál de las vistas ofrece el enfoque más nítido.

MATERIALES DE DIFERENTE INDICE OPTICO pueden fundirse en distintos rebajes existentes en el reverso de lentillas duras para crear lentes bifocales, igual que las de las gafas. Para corregir el astigmatismo, se lastra un costado de la lentilla a fin de colocarla correctamente sobre el ojo.



TORNOS CONTROLADOS POR ORDENADOR tallan los "botones" a partir de los cuales se hacen las lentillas rígidas permeables a los gases y algunas blandas. Los técnicos guían el tallado mediante un mapa topográfico del ojo del paciente.

MOLDES FUNDIDOS que pueden emplearse para producir en masa lentes de contacto blandas. La empresa Ciba Vision fabrica moldes de plástico a partir de moldes matrices metálicos para cada tipo de visión y forma de ojo posibles. El polímero se inyecta en el molde y "se endurece" con luz ultravioleta. Seguidamente las lentillas se hidratan y rematan.

¿Sabía usted que...?

- Las lágrimas se producen principalmente en la glándula lacrimal. En su mayor parte de agua y sal, contienen también proteínas, glucosa, potasio, calcio, cloro, bicarbonato, amoníaco, nitrógeno, ácido cítrico, ácido ascórbico, lisozimas y otras sustancias. La mezcla varía de una persona a otra. Las lágrimas dejan depósitos indeseables en las lentes de contacto, pero también limpian y protegen la córnea.

- La queratitis es una inflamación de la córnea. De ella hay decenas de variantes provocadas por la hipersensibilidad y las infecciones microbianas, una y otras favorecidas por el desgaste de las lentes de contacto y consecuencia habitual de una higiene insuficiente. *Pseudomonas* y *Acanthamoeba*, microorganismos presentes en el agua del grifo, son los patógenos más probables, causantes de enrojecimientos, lesiones, úlceras e infecciones. La queratitis, una enfermedad rara, se presenta sólo en 41 de cada 100.000 usuarios de lentillas de uso diario (si bien la tasa es mayor en los usuarios de lentillas de uso prolongado), según Robert Davis, de la Asociación Americana de Optometría.

- Las lentes de contacto pueden también afectar a la conjuntiva, tenue membrana mucosa que tapiza parte del ojo y los párpados. Entre los usuarios de lentillas de uso prolongado, la conjuntivitis se presenta con una probabilidad de cuatro a diez veces mayor que entre los usuarios de lentillas de uso diario. No es una enfermedad frecuente.

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2000.*

MATERIAS

AUTORES

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



CLONACION DEL ARCA DE NOE, por Robert P. Lanza, Betsy L. Dresser y Philip Damiani
En la biotecnología podría esconderse la clave para evitar la extinción definitiva de especies en peligro.

FARMACOS DEL SIDA PARA AFRICA, por Carol Ezzell
De los 35 millones de personas infectadas con el virus del sida, la mayoría viven en Africa, continente donde no es fácil el acceso a los fármacos indicados.

LA MEJORA GENETICA DEL TRIGO, por Pilar Barceló y Adoración Cabrera
Gracias al avance de las técnicas de la biología molecular, se ha logrado una mayor eficacia de los programas de mejora, un conocimiento más profundo de la genética de los caracteres de interés y nuevos sistemas de alteración de las propiedades hereditarias.

EL COHETE VASIMR, por Franklin R. Chang Díaz
Hasta ahora los cohetes se reducían a dos tipos principales: potentes y débiles; a diferencia de éstos, los primeros, sin embargo, consumen demasiado combustible. Acaba de aparecer una tercera opción que combina las ventajas de ambos.

LA EXTRAÑA PAREJA Y LA BOMBA, por William Lanouette
Entre los acontecimientos que desembocaron en la primera reacción nuclear en cadena controlada, se hallan los encuentros accidentales de personajes antagónicos.

INFORME ESPECIAL:
OCIO Y ESPECTACULO DIGITALES

CREACION DE CONVERGENCIA, por Peter Forman y Robert W. Saint John

GUERRA EN LA MUSICA, por Ken C. Pohlmann

TRANSICION EN EL RODAJE, por Peter Broderick

EL CINE DIGITAL, por Peter D. Lubell

ESCENIFICACION DE ANTROPOIDES, por Alvy Ray Smith

UN MUNDO VIRTUAL HECHO A MEDIDA, por Glorianna Davenport

